

ADEQUAÇÃO DO PROJETO MAGLEV COBRA ÀS NORMAS
INTERNACIONAIS DE SEGURANÇA FERROVIÁRIA COM ANÁLISE
APLICADA AOS LEVITADORES DO VEÍCULO

Felipe dos Santos Costa

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Fernando Augusto de Noronha
Castro Pinto

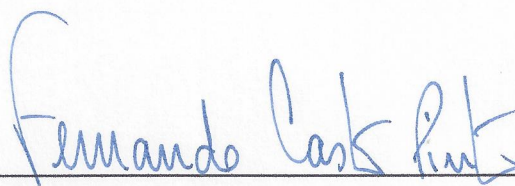
Rio de Janeiro
Março de 2018

ADEQUAÇÃO DO PROJETO MAGLEV COBRA ÀS NORMAS
INTERNACIONAIS DE SEGURANÇA FERROVIÁRIA COM ANÁLISE
APLICADA AOS LEVITADORES DO VEÍCULO

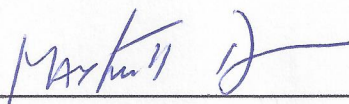
Felipe dos Santos Costa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

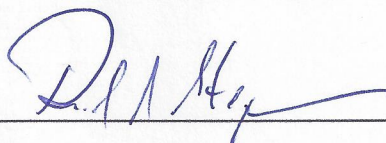
Examinada por:



Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto, Dr.-Ing.



Prof. Max Suell Dutra, Dr.-Ing.



Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2018

Costa, Felipe dos Santos

Adequação do Projeto Maglev Cobra às Normas Internacionais de Segurança Ferroviária com Análise Aplicada aos Levitadores do Veículo/ Felipe dos Santos Costa. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XI, 134 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Fernando Augusto de Noronha Castro
Pinto

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 114-117.

1. Análise de Riscos. 2. Veículo de Levitação. 3. Normas de Segurança. I. Pinto, Fernando Augusto de Noronha Castro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado não teria sido elaborada sem a ajuda de inúmeras pessoas as quais gostaria de deixar registrado meu profundo respeito e agradecimento.

Em primeiro lugar, minha esposa que sempre me apoiou e compreendeu os meus momentos de ausência para me dedicar a este estudo.

Agradeço ao meu orientador Fernando pelas valorosas dicas, ao conselheiro Marcelo Sucena por compartilhar toda sua experiência no assunto.

Agradeço aos colegas de trabalho e equipe do projeto Maglev, ao Prof. Richard e Rubens.

Agradeço à Faperj pela alocação de verba neste importante projeto possibilitando a existência deste trabalho.

Agradeço à minha família pelo imenso apoio e encorajamento e à minha pequena filha Júlia que pode acompanhar o ato de defesa com apenas quatro meses e serve de inspiração para todos os desafios presentes e futuros que venham a acontecer.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ADEQUAÇÃO DO PROJETO MAGLEV COBRA ÀS NORMAS
INTERNACIONAIS DE SEGURANÇA FERROVIÁRIA COM ANÁLISE
APLICADA AOS LEVITADORES DO VEÍCULO

Felipe dos Santos Costa

Março/2018

Orientador: Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto

Programa: Engenharia Mecânica

Este trabalho expõe uma investigação para adequar o Projeto Maglev Cobra às normas de segurança internacionais com o propósito de tornar o veículo seguro para o transporte de passageiros. Observada a lacuna de informações sobre segurança em veículos de transporte no Brasil e ainda sobre novas tecnologias aplicadas ao transporte, provou-se necessária uma pesquisa com a finalidade de definir quais seriam as melhores diretrizes ou normas de segurança a serem seguidas. Após definido o conjunto normativo, este trabalho realiza uma análise de risco baseado em metodologias largamente utilizadas nos setores ferroviário, automotivo e aeronáutico visando encontrar os componentes mais críticos do projeto. De posse destes dados, realiza-se uma análise e caracterização mecânica desse componente crítico com o objetivo de sanar defeitos de projeto e propor melhorias que atendam aos requisitos definidos pela regulamentação de segurança adequada.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SUITABILITY OF THE MAGLEV COBRA PROJECT TO THE INTERNATIONAL
RAILWAY SAFETY STANDARDS WITH ANALYSIS APPLIED TO VEHICLE
CRYOSTATS

Felipe dos Santos Costa

March/2018

Advisors: Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto

Department: Mechanical Engineering

This paper exposes an investigation to adapt the Maglev Cobra Project to the international safety standards with the purpose of making the vehicle safe for the transportation of passengers. Observing the lack of information on safety in transportation vehicles in Brazil and also on new technologies applied to transportation, a research was necessary to determine which would be the best safety guidelines or standards to be followed. After defining the normative set, this work carries out a risk analysis based on methodologies widely used in the rail, automotive and aeronautical sectors in order to find the most critical components of the project. With this data, a critical analysis and mechanical characterization of this critical component is performed with the objective of remedying design defects and proposing improvements that meet the requirements defined by the appropriate safety regulations.

Sumário

Capítulo 1- Introdução	1
Capítulo 2 - Veículos de Levitação Magnética	3
Capítulo 3 - Normas de Segurança, Certificação e estudo bibliográfico.	6
3.1 Aspectos históricos.....	6
3.2 Aspectos econômicos	8
3.3 Análise de Segurança e Norma de Segurança	9
3.4 Principais organizações de <i>Standards</i> no Brasil e no exterior	10
3.5 Áreas que mais utilizam normas de segurança para fins de certificação segundo artigos publicados	12
3.6 Enquadramento de veículos de levitação magnética	14
3.7 Regulamentação de Segurança Ferroviária no Brasil.....	16
3.8 O que diz a Legislação brasileira	18
3.9 Norma ferroviária Europeia EN 50126	21
3.10 Conclusão sobre a escolha da Norma.....	26
Capítulo 4 - Técnicas de análise de Riscos do Sistema.....	27
4.1 SSHA.....	28
4.2 FMEA.....	31
4.2.1 Análise do Equipamento (<i>hardware</i>)	33
4.2.2 Análise Funcional.....	33
4.3 FMECA	34
4.4 Análise de Criticidade (CA).....	35
4.4.1 Abordagem Quantitativa	35
4.4.2 Abordagem Qualitativa	39
4.4.3 Considerações.....	44
Capítulo 5 - Introdução à utilização da EN-50126 no Projeto Maglev	46
5.1 Fase1 – Conceito	46
5.1.1 Elaboração da fase 1 (requerimento 1).....	46
5.1.2 Requerimento 2	52
5.1.3 Requerimento 3	52
5.1.4 Requerimento 4	53
5.1.5 Requerimento 5	53
5.2 Fase 2 – Definição do sistema e Condições de Aplicação	54

5.2.1 Requerimento 1 (item 6.2.3 EN 50126)	54
5.2.2 Requerimento 2 (classificação)	58
Capítulo 6 – Realização da Análise de Criticidade	60
6.1 Resultado.....	66
Capítulo 7 – Metodologia do estudo do Criostato.....	67
7.1 - Exposição.....	68
7.1.1 Proposta de serviço.....	68
7.1.2 Princípios de Funcionamento do Criostato	70
7.1.3 Modelagem Dinâmica	74
7.1.4 Modelagem Termodinâmica (cálculo da entrada de calor)	76
7.1.5 Aspectos construtivos do Criostato	84
7.2 Análise das Falhas.....	87
7.2.1 Problemas de Projeto detectados: Vedação de flange	87
7.2.2 Avaliação de duração de Levitação:.....	88
7.2.3 Problemas de Projeto detectados: Trincas na solda interna.....	89
7.3 Manutenção dos criostatos	92
7.4 Operação Atual.....	94
7.4.1 Altura de Levitação ideal	94
Capítulo 8 – Medições de força de Levitação	95
8.1 A curva da banana	96
8.2 Equações dinâmicas	97
8.3 Equações Eletromagnéticas.....	98
8.4 Procedimento.....	100
8.5 Aparato Experimental	101
8.6 Abordagem Experimental	102
9 Conclusões	111
9.1 Trabalhos futuros	113
Bibliografia	114
Apêndice A.....	118

Índice de Figuras

Figura 1 - Levitação Eletromagnética (EML)	3
Figura 2 - Levitação Eletrodinâmica (EDL).....	4
Figura 3 - Levitação Supercondutora (SML), Maglev Cobra	4
Figura 4 - Protótipo MagLev-SML na China – (foto do autor).....	5
Figura 5 - Protótipo MagLev-SML na Alemanha – (foto do autor).....	5
Figura 6 - Publicações em certificação de segurança por áreas mais citadas em artigos técnicos.	12
Figura 7 - Normas de certificação em segurança mais utilizadas em artigos técnicos segundo [8]	13
Figura 8 - Contato entre roda e trilho.....	15
Figura 9 - Levitação Supercondutora sem contato	16
Figura 10 - Fases do ciclo de vida de RAMS da Norma EN 50126.....	22
Figura 11 - Tabela de FMEA MIL-STD-1629	32
Figura 12 - Matriz de Criticidade	41
Figura 13 - Fonte de dados para peças mecânicas e não eletrônicas Ref.[27]	45
Figura 14 - Escopo	47
Figura 15 - Ligação Ct1-Ct2	51
Figura 16 - Linha de Operação.....	56
Figura 17 - Liberdade de angulação entre vagões	57
Figura 18 - Gráfico de pizza ilustrando os modos de falha avaliados.....	66
Figura 19 - Tempo de abastecimento individual.....	68
Figura 20 - Ilustração do Sistema Maglev Cobra de transporte	69
Figura 21 - a) Antes da transição Supercondutora penetração de campo, b) Depois da transição supercondutora exclusão de campo.....	70
Figura 22 - Supercondutores do tipo II	71
Figura 23 - Fluxóides permitindo a passagem do campo magnético externo ao supercondutor e medição do fluxo de campo magnético aprisionado no interior de um Supercondutor tipo II abaixo da TC.	72
Figura 24 - Campo magnético que penetra no supercondutor.....	73
Figura 25 - Esquemático para modelagem dinâmica	74
Figura 26 - Esquema de convecção molecular	77
Figura 27 - Temperaturas de acomodação	78
Figura 28 - Aspectos construtivos do Criostato	84

Figura 29 - Parte interior e inferior do criostato com os blocos supercondutores.....	85
Figura 30 - Vedação defeituosa com <i>loctite</i>	87
Figura 31 - Pág. 65 Parker O-Ring Handbook ORD 5700.....	88
Figura 32 - Solda interna da tampa da câmara de LN2	89
Figura 33 - Zoom das trincas na solda lado esquerdo	90
Figura 34 - Zoom nas trincas da solda lado direito	90
Figura 35 - Aplicação da resina EP21TCHT-1 para fechar micro trincas na solda	91
Figura 36 - Espaço de manutenção de criostatos e etapa de cura da resina na estufa	92
Figura 37 - Estrutura de Field Cooling.....	94
Figura 38 - Curva da Banana.....	96
Figura 39 - modelagem Levitação Supercondutora, Huang et al [35].	97
Figura 40 - Sistema de medição de força de Levitação.....	101
Figura 41 - Fluxograma de ensaios	102
Figura 42 - Primeiro ciclo de ensaios para FC 35.	104
Figura 43 - Primeiro ciclo de ensaios para FC 45.	104
Figura 44 - Primeiro ciclo de ensaios para FC 55.	105
Figura 45 - Decaimento para vários FC's na posição de 10mm.	106
Figura 46 - Decaimento para vários FC's na posição de 11mm.	106
Figura 47 - Decaimento para vários FC's na posição de 12mm.	107
Figura 48 - Decaimento para vários FC's na posição de 13mm.	107
Figura 49 - Decaimento para vários FC's na posição de 14mm.	108
Figura 50 - Decaimento para vários FC's na posição de 15mm.	108

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Principais organizações de normas	10
Tabela 2 - Normas Brasileiras ABNT	17
Tabela 3 - Distribuição normalizada de Modo de Falha para FMECA.....	36
Tabela 4 - Exemplo da taxa modal de falha	37
Tabela 5 - Definição de valores de Beta.....	37
Tabela 6 - Exemplo de aplicação	38
Tabela 7 - Classificação de frequência de falha MIL HDBK 217	39
Tabela 8 - Classificação e Peso da Probabilidade de Ocorrência de Falha / FONTE: SUCENA (2001, p.131 e 134)	40
Tabela 9 - Matriz de nível de severidade	40
Tabela 10 - Classificação e Peso da Severidade das Falhas/ FONTE: SUCENA (2001, p.130 e 134)	42
Tabela 11 - Probabilidade de detecção de Falhas/ FONTE: SUCENA (2001, p.132)	43
Tabela 12 - Lista da equipe	49
Tabela 13 - Condições de operação.....	57
Tabela 14 - Hierarquia de sistemas nível Superior.....	59
Tabela 15 - classificação em grandes áreas.....	59
Tabela 16 - Índice de risco segundo o Instituto de qualidade automotiva	61
Tabela 17 - Análise de criticidade de forma Qualitativa.....	61
Tabela 18 - Resultado da Análise.....	66
Tabela 19 - Propriedades termodinâmicas do nitrogênio	76
Tabela 20 - Propriedades do vácuo	78
Tabela 21 - Valores do fator Fa.....	80
Tabela 22 - Tabela dos dados utilizados para o cálculo da entrada de calor no criostato	82
Tabela 23 - Entrada de calor total com dependência da pressão de vácuo.....	83
Tabela 24 - Tabela de ensaios de duração de levitação antes de qualquer intervenção.	88
Tabela 25 - Acompanhamento semanal de manutenção	93
Tabela 26 Configurações de ensaio.....	102
Tabela 27 Média das forças de levitação nos ensaios com FC35.....	109
Tabela 28 Média das forças de levitação nos ensaios com FC45.....	109
Tabela 29 Média das forças de levitação nos ensaios com FC55.....	109
Tabela 30 - Capacidade de transporte de carga de passageiros.....	110
Tabela 31 – Criticidade anterior ao estudo.....	113
Tabela 32 – Criticidade após o estudo	113
Tabela 33 - Componentes do Projeto até o terceiro nível	119

Capítulo 1- Introdução

Este trabalho tem por objetivo fornecer ferramentas para tornar mais seguro o transporte de passageiros no veículo de levitação magnética supercondutora Maglev Cobra desenvolvido do Brasil.

O segundo capítulo oferece uma breve visão sobre as três tecnologias de levitação magnética existentes na atualidade com foco no transporte de passageiros. Mostra as diferenças entre os veículos e as características de cada uma das técnicas: EML (forças atrativas - com controle ativo), EDL (forças repulsivas – com controle passivo) e SML (forças atrativas e repulsivas – estável não necessita de controle).

O capítulo três aborda a importância das normas de segurança contando um pouco da sua história e do surgimento das principais agências certificadoras no mundo. Revela um estudo realizado com um grande número de publicações científicas sobre o tema segurança e expõe as áreas que mais publicam sobre normas de segurança citando as mais relevantes. Expõe a situação do Brasil no que se refere à legislação e obrigatoriedade da utilização de normatização no setor de transporte de passageiros e mostra a tendência futura na utilização de diretrizes europeias para o assunto. Dessa forma apresenta a norma de segurança mais adequada para se utilizar no projeto Maglev Cobra.

O quarto capítulo descreve metodologias para realização de análise de risco, item fundamental exigido por todas as normas de segurança e foca no método mais utilizado e indicado pela EN 50.126 que é a FMECA com análise de criticidade qualitativa.

No capítulo cinco são descritas e aplicadas as duas primeiras fases do ciclo de vida da norma citada que são fundamentais para a realização da terceira fase que é justamente a análise de risco.

O capítulo seis expõe a tabela de componentes do veículo e com a realização da análise de criticidade e seu resultado. Este estudo revela que os Levitadores do veículo, chamados de criostatos, são os componentes que oferecem maior risco ao funcionamento do sistema e dessa forma precisam de uma atenção especial.

O sétimo capítulo propõe uma metodologia de estudo do criostato dividida em uma parte de exposição onde fala da proposta de serviço, explica o princípio de funcionamento da levitação supercondutora, realiza uma modelagem dinâmica e térmica do criostato e expõe os aspectos construtivos do mesmo. Outra parte de análise de falhas realizando testes de duração de levitação e propondo correções para os problemas encontrados. Mostra o procedimento de manutenção semanal implementado e o controle através de tabelas de acompanhamento. Descreve a operação atual e a necessidade de se avaliar a capacidade de carga que o levitador suporta na prática.

O capítulo oito revela as medições de força realizadas em laboratório e propõe a utilização de testes estáticos em diferentes níveis de carga ao longo do dia mostrando que os testes dinâmicos oferecem valores que não podem ser utilizados para levitação em um sistema de resposta lenta como é o caso do Maglev Cobra. Este estudo de carga por altura de levitação fornece dados que poderão ajudar os engenheiros a projetar melhor a capacidade dos veículos de transporte e escolher se priorizam a carga vertical ou estabilidade lateral de levitação.

O nono capítulo encerra o trabalho reunindo a conclusão de todo estudo realizado expondo as condições atuais do criostato e propondo melhorias no projeto deste componente de forma a reduzir os riscos e delimitando a operação com os valores de carga encontrados no estudo.

Toda bibliografia consultada encontra-se listada nas páginas finais do texto e a tabela de hierarquia de sistemas completa é exposta no apêndice A.

Capítulo 2 - Veículos de Levitação Magnética

O transporte por levitação magnética é o meio pelo qual veículos podem se locomover sem contato direto com a pista utilizando para isto forças eletromagnéticas.

Atualmente existem 3 tipos de tecnologias de transporte por levitação magnética:

A eletromagnética EML, que utiliza na via elevada trilhos ferromagnéticos e no veículo suspensão eletromagnética construída a partir de bobinas de cobre alimentadas por corrente elétrica. Esta técnica produz forças atrativas entre o veículo e a pista e utiliza sensores de distância no veículo para realimentar uma malha de controle de levitação ativa.

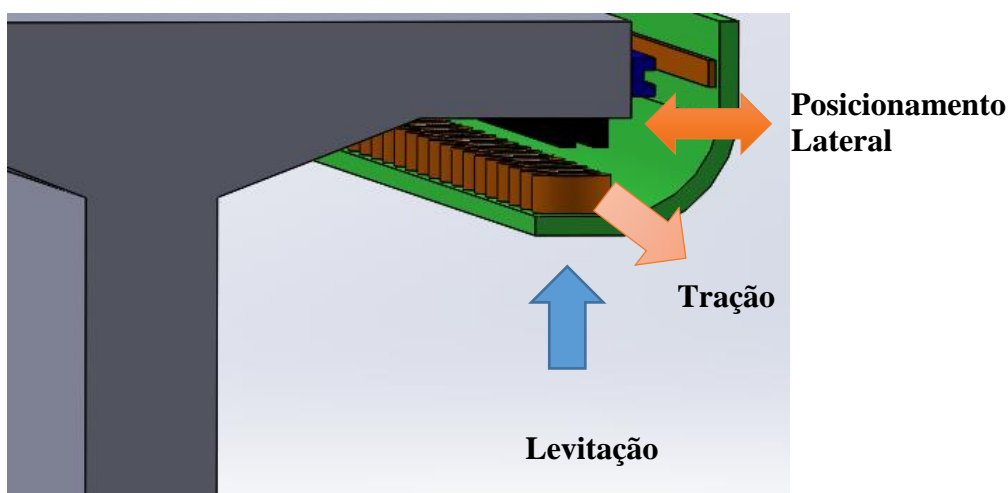


Figura 1 - Levitação Eletromagnética (EML)

Na década de 80 esta tecnologia foi empregada na Alemanha nos trens da *Transrapid* em *Emsland*. Hoje é utilizada comercialmente em Shanghai ligando o centro da cidade ao aeroporto de *Pudong*. Outras linhas operam comercialmente como em Seul na Coreia do Sul, em Nagoya no Japão e nas cidades de Changsha e Beijing na China.

A tecnologia eletrodinâmica, EDL, funciona a partir de bobinas supercondutoras instaladas no corpo do veículo que produzem um campo magnético muito forte. Na pista são instaladas bobinas de cobre em formato de “8” com uma parte para posicionamento lateral e outra para levitação. Quando o veículo se movimenta em alta velocidade pela pista o campo trafegante gerado pelo veículo induz correntes nas bobinas da pista gerando forças de repulsão e, criando assim uma estabilidade diferencial entre as laterais da pista.



Figura 2 - Levitação Eletrodinâmica (EDL)

Esta linha opera em teste na cidade de Yamanashi entre Tóquio e Nagoya no Japão já tendo atingido o recorde de velocidade de 603 km/h.

A terceira técnica de levitação, a Supercondutora, SML, só foi possível de ser implantada a partir da década de 90 quando os supercondutores e os ímãs de terras raras foram descobertos e começaram a ser fabricados ainda em pequena escala. A Levitação Supercondutora utiliza um trilho construído com ímãs de Neodímio-Ferro-Boro e supercondutores (YBCO) resfriados instalados no veículo.

Embora o funcionamento deste tipo de levitação empregue novos materiais, seu uso é mais simples pelo fato da levitação ser completamente estável. Exemplos de utilização desta tecnologia são mostrados a seguir:



Figura 3 - Levitação Supercondutora (SML), Maglev Cobra

O Maglev Cobra é um projeto desenvolvido na UFRJ que teve a construção do primeiro protótipo em escala real iniciada em 2012 [1][2][3]. Em outubro de 2014 andou pela primeira vez na pista de 200 m que foi construída especialmente para os testes desta técnica SML.

O Maglev Cobra possui o veículo com maior capacidade de transporte de passageiros funcionando em ambiente externo entre seus concorrentes de mesma tecnologia. A técnica de levitação supercondutora utilizada neste veículo será detalhada no capítulo 6. Nas figuras 4 e 5 são apresentados os 2 únicos projetos similares ao Maglev Cobra na China [4] e na Alemanha [5].



Figura 4 - Protótipo MagLev-SML na China – (foto do autor)



Figura 5 - Protótipo MagLev-SML na Alemanha – (foto do autor)

O grande destaque para a tecnologia SML é que ela é a mais jovem das 3 técnicas de levitação e ainda se encontra em desenvolvimento, portanto, não foi explorada comercialmente.

A contribuição deste trabalho é a análise do projeto implementado na UFRJ com uma visão de aplicação comercial e não do ponto de vista de uma simples pista de testes. Para dar o próximo passo e transformar o Maglev Cobra em um veículo seguro para o transporte de passageiros é necessário avaliar as questões de segurança e para isso é preciso avaliar quais são as normas que devem ser adotadas no sistema brasileiro.

Capítulo 3 - Normas de Segurança, Certificação e estudo bibliográfico.

3.1 Aspectos históricos

Até praticamente o século XVIII, a segurança em qualquer área da cadeia produtiva ou do cotidiano não possuía muita importância. Era normal que algum evento destrutivo ocorresse para que alguma atitude fosse tomada, dessa forma, as medidas realizadas eram mais corretivas do que preventivas. Faltava experiência e organização.

As primeiras mobilizações para prevenção de acidentes ocorreram na grande maioria por perdas econômicas e não em nome da segurança. Por exemplo, uma das primeiras normas de segurança em transporte observadas surgiram por volta de 1255 em Veneza [6][7], na Itália, onde o carregamento dos barcos não deveria ultrapassar a carga estipulada pelo fabricante do barco e essa verificação deveria ser realizada visualmente no momento do carregamento por um fiscal.

Muito mais tarde, em 1834, o Registro Lloyd de Navios Britânicos e Estrangeiros foi criado, permitindo assim o desenvolvimento do conceito de Segurança e Análise de Risco para os navios que serviam à Inglaterra [7].

Em 1872, a companhia alemã de certificações, *TÜV Rheinland* foi fundada fornecendo serviços de certificação técnica em segurança. Em 1894, foi fundado em Illinois, nos Estados Unidos, a *Underwriters Laboratory*, um dos mais renomados institutos de testes de produtos, certificação e criação de normas no mundo.

É interessante observar que grandes acidentes também contribuíram para a evolução das normas de segurança. Após o afundamento do Titanic, foi realizado em 1914 o primeiro tratado internacional fixando a quantidade de coletes salva vidas e botes de acordo com o número de passageiros a bordo do navio.

No final do século 19, nos EUA, havia uma quantidade muito grande de vasos de pressão explodindo devido à evolução e utilização em larga escala das máquinas térmicas. Levando a ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) a criar os códigos e *Standards* de vasos de pressão conhecidos e utilizados até hoje.

Com o surgimento das máquinas a vapor nos séculos XVIII tornou-se possível aumentar a produção e vender produtos para mais consumidores. Os meios de transporte ficaram mais rápidos, possibilitando entregar produtos onde antes era impossível. Toda essa troca comercial demandava padronização para que, por exemplo, certa tubulação encaixasse no sistema existente ou fabricado por outra empresa.

No âmbito dos transportes, a necessidade de deslocamento de pessoas aumentava a cada ano, demandando mais viagens tanto de navio quanto de trem. O crescimento das rotas marítimas e de malha ferroviária no século XIX e XX foi notável. Com a intensificação de viagens ocorreu também o crescimento no número de acidentes, número de mortes, cargas perdidas e apólice de seguros geradas, criando assim a necessidade de prevenção de acidentes e uma mobilização mundial no âmbito de criação de normas para segurança voltadas para o setor de transporte.

Com o acontecimento da segunda guerra mundial e o desenvolvimento da aviação militar surgiram, principalmente nos EUA, muitas normas na área militar como as *Army EM*, *AMCP series*, *DOT HDBK 764*, *DOE series*, *DOT*, *Mil standards*, *Navy e Air Force*, *AFOSH*, *AFR*, *AFISC*, *AFSC*, entre outras [6].

Até hoje milhares de normas foram criadas, propostas tanto por indústrias quanto por governos. Atualmente o maior desafio é unificar normas correspondentes em diferentes países do mundo como ocorre na União Europeia.

3.2 Aspectos econômicos

Com o crescimento das relações internacionais de comércio e a necessidade de deslocamento de pessoas ao redor do mundo, a preocupação com a qualidade do transporte se intensificou. A quantidade de pessoas e cargas em trânsito cresce a cada ano, ligado a isso há questões de seguro de bens e pessoas, confiança e responsabilidade de empresas, imagem pública das companhias, capital investido em cargas e produtos transportados, tempo de traslado, logísticas de operações, que tem início e fim em diferentes países, além disso, veículos que realizam estes transportes, muitas vezes são fabricados em um país e operados em outro e ainda, utilizados por diversas empresas com concessão de operação, entre outros fatores que, em caso de falha grave ou acidente, geram enormes danos financeiros e compartilham responsabilidades.

As normas e padronizações em diversas cadeias do setor produtivo e de transporte estão em toda parte. Hoje em dia é virtualmente impossível comprar algo que não esteja dentro de um padrão ou que não obedeça nenhuma norma de segurança. A mesma coisa acontece com os sistemas de transporte. Um dos principais meios de traslado utilizado atualmente em escala global é o avião que, desde meados do século XX, obedece rigidamente a conceitos de segurança e é referência em sistema seguro. Muitas das normas criadas especialmente para a aviação acabaram se estendendo para outras modalidades ainda que parcialmente, como no caso do transporte ferroviário de alta velocidade.

Os prejuízos de um acidente vão muito além do próprio evento e trazem danos e efeitos colaterais que podem afetar a população, a economia e o meio ambiente. Ainda assim, seguir todos os requisitos de segurança não significa estar livre de riscos. Exemplos não faltam: derramamento de óleo pela BP (*British Petroleum*) em 2010 no Golfo do México deixou 22 trabalhadores feridos, 12 mortos e espalhou milhares de litros de óleo no mar e foi classificado como pior desastre ambiental nos EUA; acidente de Fukushima provocado por um tsunami em 2011 derreteu 3 dos 6 reatores nucleares da usina espalhando material radioativo, causando o deslocamento de cerca de 300 mil pessoas, sendo considerado o pior desastre nuclear desde Chernobyl. Depois deste acidente grande parte dos países da União Europeia decidiram reduzir ou não utilizar

mais a geração de energia termonuclear tendo um impacto no custo da geração de energia e na economia global.

Ainda que a utilização de *Standards* de segurança não garanta a total proteção aos envolvidos, adotar e seguir estes procedimentos sem dúvida alguma é a melhor forma de mitigar os riscos conhecidos e de reduzir custos com futuros retrabalhos e ainda, aumentar a vida útil dos equipamentos, minimizando custos de parada de produção ou de funcionamento com a obrigatoriedade da manutenção. Além disso, aumenta a qualidade da segurança e reduz o pagamento de multas, e ainda, não o fazer implica em descartar parcerias comerciais globais que obrigatoriamente utilizam as certificações de segurança. Na União Europeia, por exemplo, há legislação que obriga todos os transportes serem certificados seguindo as normas do bloco.

3.3 Análise de Segurança e Norma de Segurança

A Análise de Segurança é um estudo do sistema para identificar os riscos e os pontos mais sensíveis que necessitam de cuidados especiais para que não se tornem situações perigosas (acidentes).

Entende-se por sistema o conjunto de partes ou equipamentos que, juntos, realizam uma função específica para a realização de uma determinada tarefa. O sistema pode ser global quando se trata do todo, ou pode ser local quando se trata de uma parte como, por exemplo: sistema de portas; de tração; de potência, etc.

Normas de Segurança são acordos entre organizações que conhecem, utilizam ou produzem determinado sistema e, de comum acordo, estabelecem os parâmetros mínimos que este sistema deve respeitar para mitigar os perigos encontrados na análise de risco.

3.4 Principais organizações de *Standards* no Brasil e no exterior

No Brasil o principal órgão normativo é a ABNT, que é responsável pela publicação das Normas Brasileiras (ABNT NBR), elaboradas por seus Comitês Brasileiros (ABNT/CB), Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE).

No exterior, outras instituições internacionais se destacam, sejam as principais listadas na tabela 1.

Tabela 1 - Principais organizações de normas

<u>Organização</u>	<u>Sigla</u>	<u>País</u>
<u><i>Bureau of Indian Standards</i></u>	<u>BIS</u>	<u>Índia</u>
<u><i>Badan Standardisasi Nasional</i></u>	<u>BSN</u>	<u>Indonésia</u>
<u><i>Spanish Association for Standardization and Certification</i></u>	<u>AENOR</u>	<u>Espanha</u>
<u><i>French association for Standardization</i></u>	<u>AFNOR</u>	<u>França</u>
<u><i>American National Standards Institute</i></u>	<u>ANSI</u>	<u>EUA</u>
<u><i>British Standards Institution</i></u>	<u>BSI</u>	<u>U.K.</u>
<u><i>Dirección General de Normas</i></u>	<u>DGN</u>	<u>México</u>
<u><i>Deutsches Institut für Normung</i></u>	<u>DIN</u>	<u>Alemanha</u>
<u><i>Instituto Argentino de Normalización y Certificación</i></u>	<u>IRAM</u>	<u>Argentina</u>
<u><i>Bureau of Standards of Jamaica</i></u>	<u>BSJ</u>	<u>Jamaica</u>
<u><i>Euro-Asian Council for Standardization, Metrology and Certification</i></u>	<u>GOST</u>	<u>Rússia</u>
<u><i>Colombian Institute of Technical Standards and Certification</i></u>	<u>ICONTEC</u>	<u>Colômbia</u>
<u><i>Luxembourg Institute for Standardization, Accreditation, Security, and Quality of Products and Services</i></u>	<u>ILNAS</u>	<u>Luxemburgo</u>

<u><i>Japanese Industrial Standards Committee</i></u>	<u>JISC</u>	<u>Japão</u>
<u><i>Korean Agency for Technology and Standards</i></u>	<u>KATS</u>	<u>Corea do Sul</u>
<u><i>Nederlandse Norm</i></u>	<u>NEN</u>	<u>Países Baixos</u>
<u><i>South African Bureau of Standards</i></u>	<u>SABS</u>	<u>África do Sul</u>
<u><i>Standardization Administration of China</i></u>	<u>SAC</u>	<u>China</u>
<u><i>Standards Council of Canada</i></u>	<u>SCC</u>	<u>Canadá</u>
<u><i>Swedish Standards Institute</i></u>	<u>SIS</u>	<u>Suécia</u>
<u><i>Finnish Standards Association</i></u>	<u>SFS</u>	<u>Finlândia</u>
<u><i>Standards Norway</i></u>	<u>SN</u>	<u>Noruega</u>
<u><i>Estonian Centre for Standardisation</i></u>	<u>EVS</u>	<u>Estônia</u>
<u><i>Swiss Association for Standardization</i></u>	<u>SNV</u>	<u>Suíça</u>
<u><i>Standards New Zealand</i></u>	<u>SNZ</u>	<u>Nova Zelândia</u>
<u><i>Ente nazionale italiano di unificazione</i></u>	<u>UNI</u>	<u>Itália</u>
<u><i>Standards Australia</i></u>	<u>SAI</u>	<u>Austrália</u>
<u><i>Jabatan Standard Malaysia</i></u>	<u>DSM</u>	<u>Malásia</u>
<u><i>Instituto Português da Qualidade</i></u>	<u>IPQ</u>	<u>Portugal</u>

* http://www.iso.org/iso/about/iso_members.htm Membros ISO, (2012)

3.5 Áreas que mais utilizam normas de segurança para fins de certificação segundo artigos publicados

Um estudo de Sunil Nair [8] realizado em 2014, fazendo o uso do método SLR (*Systematic Literature Review*), utilizando como base 4963 trabalhos publicados entre 1990 e 2012, revelou dados sobre áreas críticas como aviação, ferrovias, setor automotivo e nuclear que necessitam de Certificação de segurança para operar.

Este estudo separou oito grandes áreas que mais publicaram trabalhos sobre o tema da seguinte forma:

- (1) Aeroespacial com sistemas em aeronaves que voam na atmosfera ou no espaço;
- (2) Aviação com sistemas de aeronaves que voam na troposfera;
- (3) Automotivo com sistemas de carros que trafegam em rodovias;
- (4) Energia Marítima e *offshore* que tratam de sistemas em navios ou unidades offshore de óleo, gás e extrações naturais;
- (5) Medicina e cuidados da saúde;
- (6) Nuclear com sistemas de plantas e controles nucleares;
- (7) Ferrovia com sistemas de veículos guiados por trilhos;
- (8) Robótica, no que diz respeito a projeto, construção, operação e aplicação.

As áreas citadas nos artigos avaliados por Sunil Nair podem ser resumidas conforme gráfico adaptado de [8] na Figura 6.

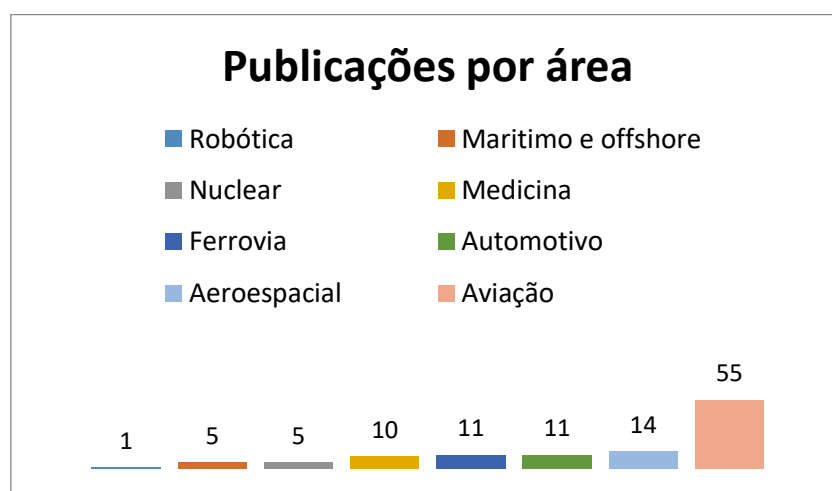


Figura 6 - Publicações em certificação de segurança por áreas mais citadas em artigos técnicos.

As normas de Segurança mais relevantes apuradas neste estudo estão distribuídas conforme o gráfico da Figura 7 a seguir:

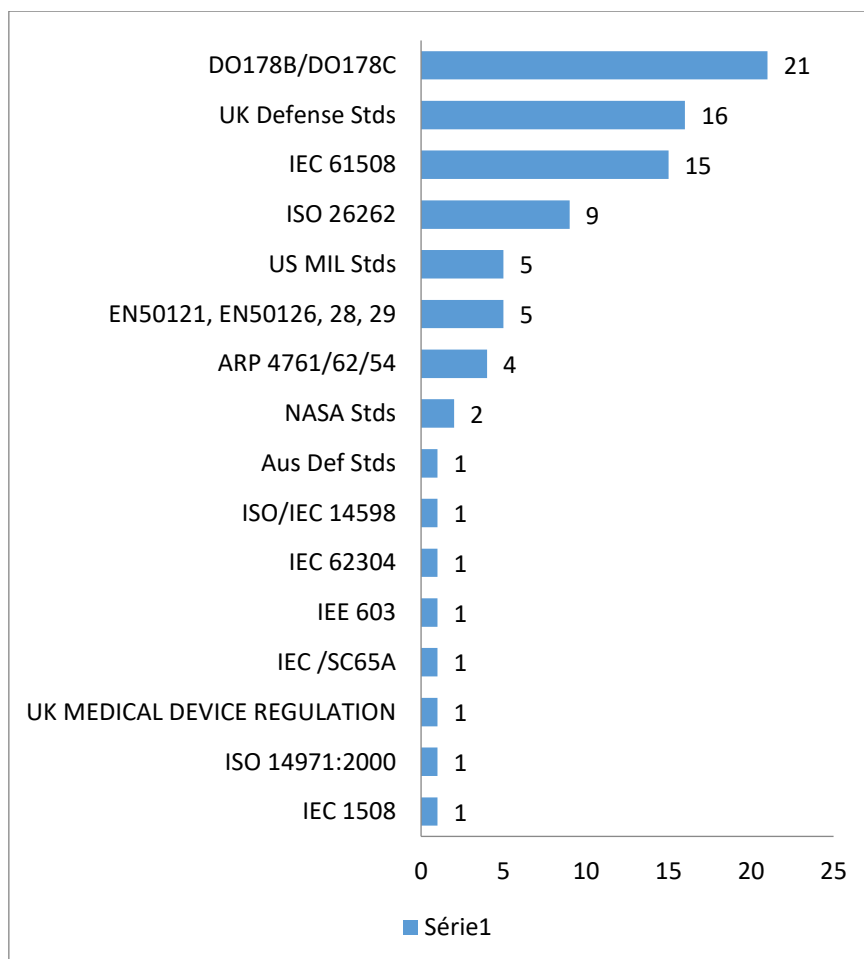


Figura 7 - Normas de certificação em segurança mais utilizadas em artigos técnicos segundo [8]

Das Normas citadas neste estudo e alocadas no gráfico, somente as seguintes podem ser aplicadas diretamente a transporte de passageiros:

- IEC 61508 (*Functional Safety*);
- ISO 26262 (Segurança funcional para veículos automotores em rodovia);
- EN 50121, 126, 128, 129 (Aplicação para ferrovias);

Vale ressaltar que a IEC 61508 (*Functional safety*) é uma norma de aplicação genérica que trata de segurança funcional em sistemas elétricos e eletrônicos largamente utilizada na indústria.

A ISO 26262 (*Road vehicles – Functional safety*) é uma norma internacional específica do setor automotivo utilizada desde as etapas de especificação do produto,

desenvolvimento, projeto, implementação, integração, verificação, validação e liberação do produto final.

As normas CENELEC EN 50121 (*Railway applications - Electromagnetic compatibility*), 50126 (*Railway applications - The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)*), 50128 (*Railway applications - Communications, signalling and processing systems*), 50129 (*Railway applications - Communications, signalling and processing systems - Safety related electronic systems for signalling*), são de aplicação específica em ferrovias.

3.6 Enquadramento de veículos de levitação magnética

O transporte por meio de veículo de levitação supercondutora se difere dos meios convencionais de transporte por alguns fatores como por exemplo:

- Não toca o solo;
- É tracionado por um tipo de motor elétrico linear;
- O freio não é aplicado em nenhuma estrutura rodante;
- Seus trilhos são compostos de fortes ímãs de terras raras;
- Há uma segunda parte do motor que é instalada na via;
- O peso do vagão deve ser muito menor do que os vagões de trens convencionais.

Porém, este meio de transporte possui muita similaridade com o transporte ferroviário em sua operação no que diz respeito à:

- O veículo é composto por vários carros que podem ser adicionados de acordo com a necessidade formando uma composição;
- O seu tráfego é segregado em via exclusiva;
- O veículo só se movimenta sobre trilhos;
- Sua implantação demanda construção de estações de embarque e desembarque de passageiros do mesmo modo que qualquer trem de passageiros convencional;
- Seu controle de tráfego é semelhante ao da ferrovia;
- Sua sinalização é semelhante à da ferrovia;

- Para mudança de via deve utilizar aparelho de mudança de via (AMV) específico;
- Deve possuir os mesmos sistemas de segurança e comunicação;

Dessa forma é possível concluir que o veículo de levitação magnética é um tipo de transporte muito semelhante à uma ferrovia, neste caso em particular (“magnetovia”) e que algumas modificações específicas são necessárias por não possuir o contato roda-trilho natural da ferrovia.

A seguir são apresentadas duas fotografias que demonstram este fato. A figura 8 demonstra o contato entre roda e trilho no sistema ferroviário tradicional. A figura 9 destaca a sustentação magnética, sem contato físico entre o material rodante e a *magnetovia*.



Figura 8 - Contato entre roda e trilho

Fonte: <http://smtgroup.com/railway-wheel-shop-equipment/underfloor-technology/underfloor-wheel-lathe> em 03/04/2018

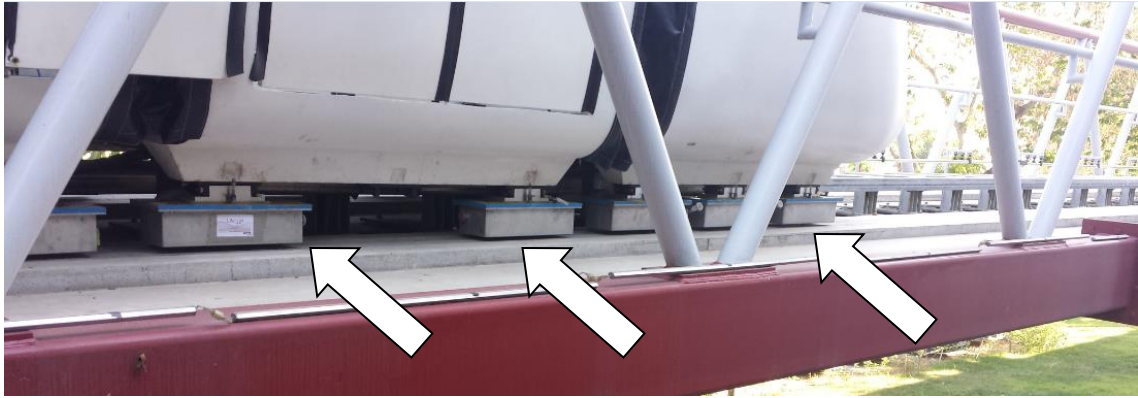


Figura 9 - Levitação Supercondutora sem contato

Assim, o que se nota é que não havendo regulamentação de segurança específica para veículos de Levitação Supercondutora no Brasil e no exterior, a regulação ferroviária tradicional pode ser aplicada devido às similaridades.

3.7 Regulamentação de Segurança Ferroviária no Brasil

No Brasil, diferente de outros países, não há Lei que obrigue a utilização de uma norma específica, apenas aponta a necessidade da atenção à segurança e aplicação de normas vigentes. A regulamentação normativa dos sistemas de transporte é competência do Ministério dos Transportes.

A Agência Nacional de Transportes Terrestres [9], ANTT, possui a responsabilidade de gerir os serviços de transporte terrestres e no caso da ferrovia, tem a incumbência de concessão (transporte ferroviário associado à exploração da infraestrutura), permissão (transporte coletivo regular de passageiros pelos meios rodoviário e ferroviário não associados à exploração da infraestrutura) e autorização (transporte de passageiros por empresa de turismo e sob regime de fretamento, transporte internacional de cargas , transporte multimodal e terminais.).

A ABNT, cuja finalidade é elaborar normas técnicas brasileiras, cita a não obrigatoriedade do seguimento de normas aplicáveis no Brasil, e informa que seu cumprimento é de caráter voluntário e só se aplica em casos especificados pelo código de defesa do consumidor. Segue trecho retirado do site da ABNT [10]:

“Em diversos países há obrigatoriedade de segui-las, pelo menos em algumas áreas (para o caso brasileiro, é o Código de Defesa do Consumidor). Por outro lado, fornecer um produto que não siga a norma aplicável no mercado-alvo implica esforços adicionais para introduzi-lo nesse mercado, que incluem a necessidade de demonstrar de forma convincente que o produto atende às necessidades do cliente e de assegurar que questões como intercambialidade de componentes e insumos não representarão um impedimento ou dificuldade adicional. Do ponto de vista legal, em muitos mercados, quando não é seguida a norma aplicável, o fornecedor tem responsabilidades adicionais sobre o uso do produto.”

****<http://www.abnt.org.br/normalizacao/o-que-e/o-que-e>*

Já o código de defesa do consumidor veda a oferta de produtos que não respeitem as normas vigentes no país ou por tratados internacionais dos quais o país seja signatário [11].

Sendo assim, devem ser avaliadas as Normas Brasileiras ABNT [10] para transporte de passageiros no setor ferroviário quanto à sua aderência ao sistema de transporte por levitação magnética. A Tabela 2 explicita estas Normas.

Tabela 2 - Normas Brasileiras ABNT

ABNT NBR 14077:1998	Segurança do usuário - Comunicação visual.
ABNT NBR 16074:2013	Sistema Movimentador Automático de Pessoas (Sistema APM).
ABNT NBR 15570:2011	Transporte — Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros.
ABNT NBR 15570:2009 Emenda 1:2011	Transporte - Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros.
ABNT NBR 14183:2015	Trem metropolitano — Acomodação e capacidade de passageiros.
ABNT NBR ISO 14813-1:2011	Sistemas inteligentes de transporte — Arquitetura (s) de modelo de referência para o setor de ITS

	Parte 1: Domínios de serviço, grupos de serviço e serviços de ITS.
ABNT NBR 16336:2014	Locomotivas – Operação por rádio controle remoto – Requisitos mínimos de Segurança.
ABNT NBR 14139:2013	Via férrea – Locomotiva – inspeção de Segurança do tráfego.
ABNT NBR14137:1998	Segurança no tráfego – Inspeção e Segurança no tráfego de auto de linha.
ABNT NBR 14138:1998	Via férrea – Trem – revista e equipagem – inspeção de segurança do tráfego.
ABNT NBR 14077:1998	Segurança do usuário – Comunicação Visual.
ABNT NBR 13899:1997	Segurança do tráfego ferroviário – Trem de socorro.
ABNT NBR 7609:1992	Vagão ferroviário – dispositivo de Segurança.
ABNT NBR 12754:2011	Locomotiva ferroviária – sistema de vigilância - Requisitos
ABNT NBR 15868:2010	Acidente ferroviário – Classificação, comunicações e relatório.

3.8 O que diz a Legislação brasileira

A autorização para circular quaisquer veículos ferroviários deve ser solicitada às Administrações Ferroviárias (atuais concessionárias de transporte ferroviário de cargas), nos termos do Regulamento dos Transportes Ferroviários - RTF, aprovado pelo Decreto 1.832, de 4 de março de 1996, e dos contratos de concessão. Este decreto possui as seguintes disposições segundo [12]:

“ DECRETO Nº 1.832, DE 4 DE MARÇO DE 1996.

Art. 1º Este Regulamento disciplina:

I - As relações entre a Administração Pública e as Administrações Ferroviárias;

II - As relações entre as Administrações Ferroviárias, inclusive no tráfego mútuo;

III - as relações entre as Administrações Ferroviárias e os seus usuários; e

IV - A segurança nos serviços Ferroviários.”

Sendo o capítulo que diz respeito à segurança o seguinte:

**“CAPÍTULO IV
DA SEGURANÇA**

Art. 54. A Administração Ferroviária adotará as medidas de natureza técnica, administrativa, de segurança e educativa destinadas a:

I - Preservar o patrimônio da empresa;

II - Garantir a regularidade e normalidade do tráfego;

III - Garantir a integridade dos passageiros e dos bens que lhe forem confiados;

IV - Prevenir acidentes;

V - Garantir a manutenção da ordem em suas dependências;

VI - Garantir o cumprimento dos direitos e deveres do usuário.

Art. 55. Compete à Administração Ferroviária exercer a vigilância em suas dependências e, em ação harmônica, quando necessário, com a das autoridades policiais competentes.

Art. 56. Em caso de conflito ou acidente, havendo vítima, o responsável pela segurança é obrigado a, de imediato, providenciar o socorro às vítimas e dar conhecimento do fato à autoridade policial competente, na forma da lei.

Art. 57. Aquele que praticar ato definido como crime ou contravenção será encaminhado, pela segurança da ferrovia, à autoridade policial competente.”

Sendo assim, no que tange à segurança e análise de risco observa-se que não há norma vigente específica.

Há atualmente um acordo de cooperação técnica internacional (EPL/ PNUD/ INECO) [13] que elaborou relatórios de modelo de gestão da segurança ferroviária que está na sua versão 6 (junho de 2015). O Relatório 6, no capítulo 1.3 sobre Normativa de Referência propõe que seja utilizado no Brasil um modelo de segurança ferroviária baseado em modelos estrangeiros, mas que considerem as necessidades específicas brasileiras. Para isso, o relatório menciona diretivas europeias demonstrando clara tendência a seguir. Tais documentos são:

- Diretiva 2004/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 29 de abril de 2004.

Esta Diretiva tem por objeto garantir o fomento e a melhoria da segurança dos trens comunitários, bem como favorecer o acesso ao mercado aos serviços de transporte ferroviário mediante:

- A harmonização da estrutura reguladora;
- A definição de responsabilidades entre as partes;
- O desenvolvimento de métodos comuns de segurança com vistas a uma maior harmonização;
- O estabelecimento de uma autoridade responsável em matéria de segurança e de um órgão de investigação de acidentes e incidentes;
- A definição de princípios comuns de gestão, regulação e supervisão da segurança ferroviária.

- Regulamento (UE) N° 1158/2010 da Comissão, de 9 de dezembro de 2010.

Refere-se a método comum de segurança para avaliar a conformidade com os requisitos para a obtenção de um Certificado de Segurança ferroviária (para os Operadores Ferroviários).

- Regulamento (UE) N° 1169/2010 da Comissão, de 10 de dezembro de 2010.

Trata de um método comum de segurança para avaliar a conformidade com os requisitos para a obtenção de uma Autorização de Segurança ferroviária (para os Gestores de Infraestrutura).

- Regulamento (UE) N° 1077/2012 da Comissão, de 16 de novembro de 2012.

Destaca um método comum de segurança para a supervisão pelas autoridades nacionais de segurança após a expedição de Certificado de Segurança ou Autorizações de Segurança.

3.9 Norma ferroviária Europeia EN 50126

Como já havia sido citada no item 2.5 na figura 7 e mais uma vez no item anterior, na afirmação de que o Brasil deverá em um futuro próximo seguir referências europeias o natural é analisar esta norma.

A *Railway Applications* EN 50126 contempla as etapas e conceitos de Especificação, Demonstração, Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade, que em inglês é abreviada como "RAMS" [14].

Esta norma é a vigente em todo bloco europeu e é imposta por lei. Há também indícios que será implementada em toda Ásia, pelo fato de haver o uso de tecnologia tanto oriental como ocidental nos meios de transporte asiático e europeu.

Tal norma visa promover entre as autoridades ferroviárias, a indústria ferroviária e seus operadores uma forma consistente e viável da administração do RAMS. Para isso analisa o ciclo de vida de RAMS dos componentes da ferrovia nas seguintes fases explicitadas na figura 10:

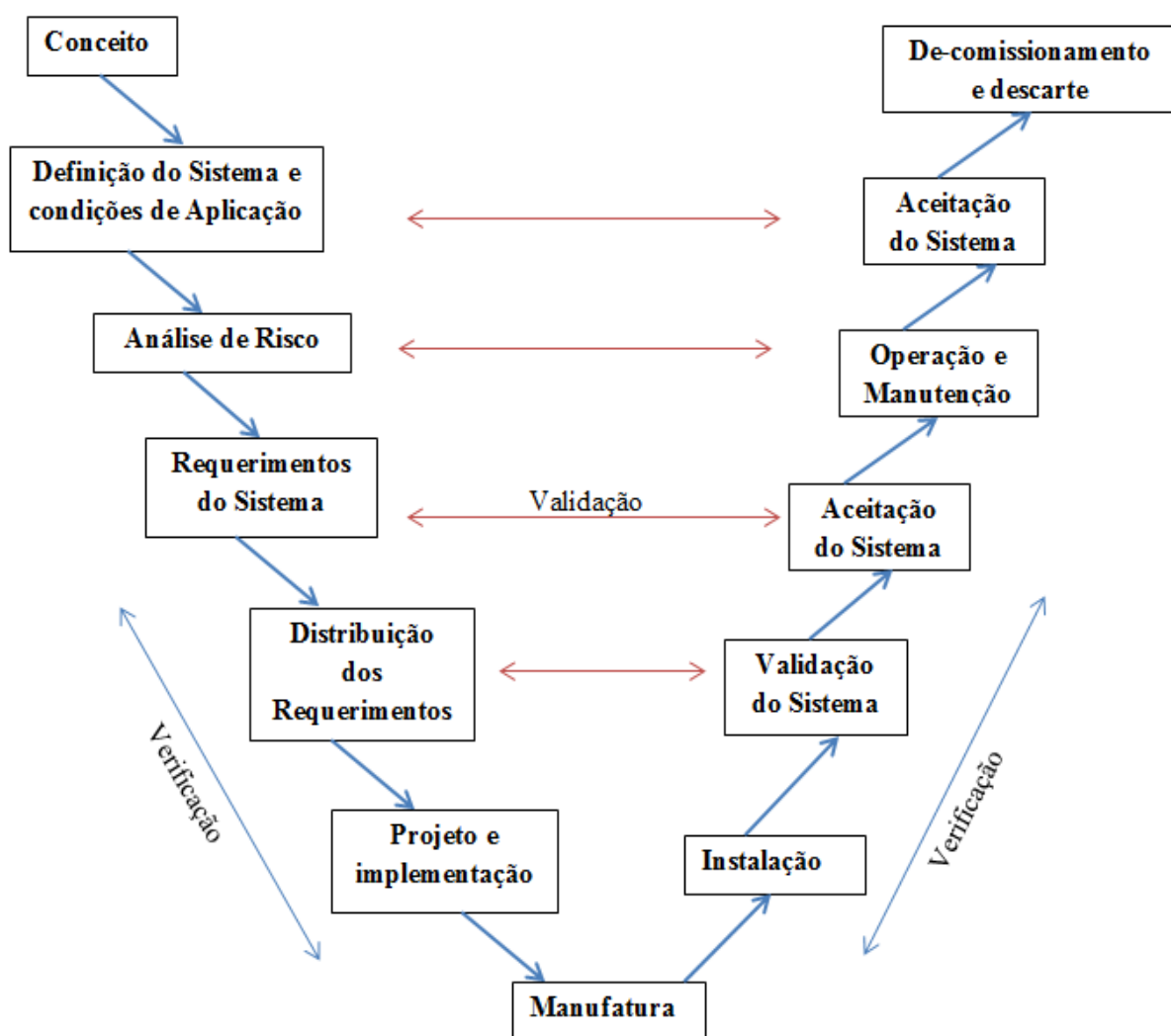


Figura 10 - Fases do ciclo de vida de RAMS da Norma EN 50126

Fase 1: Conceito.

O objetivo desta fase é desenvolver um nível de conhecimento suficiente que permita a realização de todos os níveis subsequentes do ciclo de vida.

Fase 2: Definição do sistema e condições de aplicação.

Os objetivos desta fase são:

- Definir a "missão" do sistema;
- Definir as fronteiras do sistema;
- Estabelecer as condições de aplicação que influenciam nas características do sistema;
- Definir o escopo da análise de riscos;
- Estabelecer a política de RAMS para o sistema;
- Estabelecer o Plano de segurança para o Sistema;

Fase 3: Análise de Risco.

Os objetivos desta fase são:

- Identificar os perigos associados com o sistema;
- Identificar os eventos que levam a situações perigosas;
- Determinar o risco associado com os perigos;
- Estabelecer um processo para o gerenciamento contínuo de risco;

Fase 4: Requerimentos do Sistema.

Os objetivos desta fase são:

- Especificar os requerimentos gerais de RAMS para o sistema;
- Especificar os requerimentos gerais de critérios demonstração e aceitação para RAMS do sistema;
- Estabelecer o programa de controle de tarefas RAM para as fases subsequentes do ciclo de vida.

Fase 5: Distribuição dos requerimentos do Sistema.

Os objetivos desta fase são:

- Dividir os requerimentos gerais de RAMS do sistema para os subsistemas designados, componentes e instalações externas;
- Definir critérios de aceitação de RAMS para os subsistemas designados, componentes e instalações externas;

Fase 6: Projeto e implementação.

Os Objetivos desta fase são:

- Criar subsistemas e componentes conforme os requerimentos de RAMS;
- Demonstrar subsistemas e componentes conforme requerimentos de RAMS.
- Estabelecer para as próximas tarefas do ciclo de vida que envolvem RAMS.

Fase 7: Manufatura.

Os objetivos desta fase são:

- Implementar um processo de manufatura que produza subsistemas e componentes validados pelo RAMS;
- Estabelecer garantias centradas em processos de RAMS;
- Estabelecer regime de apoio para os componentes e subsistemas de acordo com RAMS.

Fase 8: Instalação.

Os objetivos desta fase são:

- Montagem e instalação da combinação total dos subsistemas e componentes requeridos para formar o sistema completo;
- Iniciar o regime de apoio ao sistema.

Fase 9: Validação do Sistema.

Os objetivos desta fase são:

- Validar que a combinação total dos componentes e subsistemas com as medidas de redução de riscos externos estão de acordo com os requerimentos de RAMS para o sistema;
- Licenciar a combinação total dos subsistemas, componentes e medidas de redução de riscos externos;
- Preparar e, se apropriado aceitar, a aplicação do *Specific Safety Case* para o sistema;
- Providenciar aquisição de dados e gerenciamento.

Fase 10: Aceitação do Sistema.

Os objetivos desta fase são:

- Avaliar o cumprimento da combinação total dos subsistemas e componentes e as medidas de redução de riscos externos com os requerimentos gerais de RAMS do sistema completo;
- Aceitação do sistema para entrar em serviço.

Fase 11: Operação e Manutenção.

Os objetivos desta fase são:

- O objetivo desta fase deve ser operar (com limites especificados), manter e dar suporte ao sistema completo de forma que os requerimentos de RAMS sejam mantidos.

Fase 12: Monitoramento de Performance.

Os objetivos desta fase são:

- Manter a confiança da performance do RAMS para o sistema através da coleta de dados e análises para avaliar as estatísticas de RAMS.
- Verificar se os dados coletados coincidem com as premissas do *Safety Case*.

Fase 13: Modificação.

Os objetivos desta fase são:

- Controlar as modificações e realimentar as tarefas de cada fase para manter os requerimentos de RAMS atualizados.

Fase 14: “Descomissionamento” e Descarte.

Os objetivos desta fase são:

- Controlar as tarefas de descarte para todas as partes que não sejam mais necessárias.

A EN50126 é obrigatória em toda Europa e também é utilizada em alguns países asiáticos [15] e em outros onde há crescentes estudos de aplicação, segundo Fukuoka [16].

3.10 Conclusão sobre a escolha da Norma

A falta de norma específica brasileira no quesito análise de segurança e risco em serviço de transporte ferroviário no Brasil, observando a clara tendência à uma concepção de uma possível norma brasileira nos moldes das normas do bloco europeu, indica que para a certificação de um projeto inédito no Brasil e na América Latina deve-se aplicar a norma EN 50126. Tal referência normativa além de ser destacada na mobilização realizada pela INECO, é a norma mais completa neste sentido. Vem sendo adotada em todo bloco europeu que contém 28 estados membros caminhando para a unificação normativa. Esta medida facilita ainda trocas de tecnologia e propicia relações comerciais de possíveis interessados neste nicho de mercado.

Por ser uma norma integrada que cuida desde a concepção de projeto até o descarte do produto no final do seu ciclo de vida, facilita o procedimento de certificação evitando as redundâncias e conflitos de normas diversas sobre assuntos vinculados como é o caso do Brasil atualmente.

Capítulo 4 - Técnicas de análise de Riscos do Sistema

Neste capítulo serão apresentadas várias técnicas para avaliar fatores de risco para o projeto de sistemas de engenharia. Nesta avaliação podem ser aplicadas o risco operacional da missão do sistema quanto o risco de segurança que envolve a integridade física das pessoas que participam da operação, sejam funcionários ou usuários.

Bahr N.J. [6] diz que a segurança não é um item quantificável; ela é um conjunto complementar do Risco. Ela só pode existir quando o agente causador do perigo é impedido de agir.

Ações ou eventos que trazem algum tipo de perigo podem ser medidos e classificados quanto sua severidade, frequência de ocorrência, probabilidade de detecção, nível de aceitação, impacto econômico, criticidade etc.

A missão do sistema é definida pela tarefa a ser executada, como por exemplo: a missão do sistema de levitação é levantar a mais de 10 mm do trilho, dentro de condições dinâmicas de funcionamento, durante pelo menos 10 horas de operação. Qualquer falha da levitação impede que esse sistema complete sua missão e todos os fatores causadores dessa falha devem ser analisados para que sejam corrigidos.

Os métodos para análise de risco em sistema, estudados nesta dissertação, são: o SSHA (Análise de Perigos dos Subsistemas), FMEA (Análise do Modo de Falha e Efeitos), FMECA (*Análise do Modo de Falha, Efeitos e Criticidade*). A seguir tais métodos serão detalhados para que seja possível identificar suas vantagens e desvantagens.

4.1 SSHA

Os riscos de um sistema são frequentemente associados aos riscos dos subsistemas, montagens, submontagens e componentes. Um dos métodos para análise dos subsistemas é a SSHA, que visa identificar as suas falhas no projeto, modo de falha dos componentes, erros de operação humanos e riscos relacionados com a interação entre os subsistemas.

A documentação do SSHA deve seguir os parâmetros da DI-SAFT-80101 Ref. [17]. As principais especificações são:

1. Sumário dos resultados;
2. Lista dos riscos identificados para incluir as informações:
 - a. Modo de falha dos componentes;
 - b. Fase do sistema em que o evento foi encontrado;
 - c. Descrição do risco;
 - d. Efeito no subsistema ou sistema;
 - e. Gerenciamento de risco definido em MIL-STD-882 [18];
 - f. Ação recomendada para eliminar o risco;
 - g. Efeito da ação recomendada.
 - h. Anotações;
 - i. Status das ações para redução dos riscos;

Os subitens do item 2 são geralmente apresentados em formato de tabela. Adiante eles serão detalhados.

➤ Modo de Falha (MF)

É chamado modo de falha a maneira pela qual a falha é observada e descreve a forma como a mesma ocorre assim como seus efeitos no equipamento ou sistema. São citadas REF. [18] como 7 tipos de MF os seguintes:

1. Operação prematura;
2. Falha ao operar durante o tempo previsto;
3. Operação intermitente;
4. Falha para cessar a operação no tempo previsto.

5. Perda de rendimento ou falha durante a operação;
6. Degradação do sinal de saída ou perda de capacidade operacional;
7. Outras condições únicas de falha, quando aplicáveis, baseadas nas características do sistema e nos requerimentos operacionais ou restrições.

➤ Fase do Sistema

Diz respeito às fases do ciclo de vida do equipamento, as quais incluem a fase de projeto, pesquisa, desenvolvimento, testes e validações, produção, operação e descarte.

➤ Descrição do Risco

É a condição em potencial na qual pode acontecer um evento, ou série de eventos, nas quais podem resultar em morte, ferimento, doença ocupacional, danos ou perda do equipamento ou danos ao meio ambiente.

➤ Efeito no subsistema ou sistema

Resultado direto da falha que pode ser sentido nos subsistemas ou no sistema como um todo. Como exemplo pode-se citar uma falha que gere um curto-circuito e leve à queima de um fusível em um subsistema, podendo causar a parada do equipamento principal.

➤ Gerenciamento de Risco

O gerenciamento de risco envolve atividade de pessoal com objetivo de encontrar situações perigosas e reduzir a possibilidade de ocorrência desses eventos pelas ações que visam mitigar o risco. O gerenciamento de risco é ligeiramente diferente de gerenciamento de segurança o qual lida com os níveis de aceitação dos riscos, implementação de redundâncias, conceitos de falha segura etc.

➤ Ação recomendada para eliminar o risco

Depois de encontrados o modo de falha e o efeito no sistema, pelo gerenciamento de risco deve-se desenvolver um meio de sanar o problema, utilizando a troca de componentes, adequação de projeto, implementação de manutenção mais adequada, adequação de operação, treinamento de pessoal etc.

➤ Efeito da Ação Recomendada

Diz respeito à ação a ser realizada para sanar o problema observado. Como por exemplo uma indicação de manutenção ou troca de componente.

➤ Anotações

Onde são registrados os processos de execução das modificações necessárias.

➤ Status das ações

Espaço reservado para identificar se a ação corretiva foi efetuada ou não.

Alguns critérios são utilizados para selecionar o método da utilização da SSHA. Esses critérios se baseiam no nível de profundidade que a análise deve atender, dependendo do tipo de equipamento que será analisado e os objetivos que se pretende alcançar com o melhor custo-benefício. Robert B. [19] propõe que os principais itens que devem ser analisados quanto às restrições antes de começar o procedimento sejam:

1. Especificar as quantidades apenas quando for essencial;
2. Restringir ao mínimo os níveis de subdivisões do equipamento para ser incluído na análise;
3. Limitar os efeitos de falha para os essenciais para satisfazer o propósito da análise;
4. Utilizar somente os modos de falha mais prováveis para satisfazer a análise;
5. Restringir o uso de FTA apenas para os efeitos muito severos;
6. Limitar a documentação da análise para o essencial a fim de atingir o propósito.

Dependendo do ponto de amadurecimento do sistema faz-se necessário também definir se a avaliação será funcional ou do equipamento em si (física). Em projetos que estão na sua fase de desenvolvimento muitas vezes não é possível identificar ainda qual equipamento realizará uma tarefa específica, mas já se sabe exatamente qual será a função desse equipamento e, assim, é possível realizar uma análise funcional e posteriormente atualizar esta análise quando o equipamento for definido.

Para a realização desta análise sugerem-se alguns passos:

1. Definir o sistema ou equipamento e seus requerimentos;
2. Estabelecer regras, pressupostos e critérios de falha;
3. Representar em forma de diagrama de blocos ou sequência de eventos;
4. Identificar modos de falha, métodos de detecção de falhas e outros requerimentos;
5. Avaliar a criticidade de cada modo de falha;

6. Prover ações corretivas e avaliar a adequação das mesmas;
7. Documentar a análise e recomendar ações para os itens que não podem ser corrigidos, além de sugerir modificações que devem ser realizadas na manutenção.

4.2 FMEA

A FMEA foi criada logo depois da 2ª Guerra mundial como uma ferramenta de engenharia para melhorar as configurações dos equipamentos. Baseia-se na modelagem sistemática que pode ser usada para diferentes propósitos, especialmente quando acidentes podem ocorrer motivados pela falha de um componente.

Este método contribui significativamente para reduzir a probabilidade de falha em novos produtos e processos, além daqueles que se encontram em operação. Destes, deve-se levar em conta as falhas que já ocorreram para assim aumentar a confiabilidade e a qualidade.

Este método pode ser utilizado para analisar o equipamento (*hardware*) ou a sua função. A seguir a figura 6 mostra como deve ser a tabela de acordo com a norma MIL-STD-1629 [20] que deve conter pelo menos os seguintes campos:

- a) Número de identificação;
- b) Nome do item;
- c) Função;
- d) Modo de falha;
- e) Fase da missão;
- f) Efeito da falha;
- g) Método de detecção;
- h) Anotações particulares quando necessário.

Sistema _____					Data _____						
Nome da Peça _____					Folha _____ de _____						
Desenho de Referência _____					Verificado por _____						
Missão _____					Aprovado por _____						

Número de identificação	Item	Função	Modo de falha e causas	Fase da missão/operação	Efeito das falhas			Método de detecção de falha	Medidas de compensação	Anotações
					Efeito local	No próximo nível	Efeitos finais			

Figura 11 - Tabela de FMEA MIL-STD-1629

Onde:

- a) Número de identificação: Referente ao registro do item ou sistema avaliado;
- b) Nome do item: Nome do componente ou sistema avaliado;
- c) Função: Função exercida para determinada tarefa em análise;
- d) Modo de falha: De qual maneira este componente falha na sua tarefa;
- e) Fase da missão: Em qual etapa de operação a falha ocorre;
- f) Efeito da falha: Efeito direto da falha do componente, efeito da falha no seu subsistema, efeito final no conjunto global da falha do componente;
- g) Método de detecção: Como é possível detectar que tal componente apresenta falha ou irá falhar? Método visual? Existe luz de falha? Análise do material? Líquido penetrante? Indícios de superaquecimento? Cheiro de queimado? Camada de proteção violada?
- h) Anotações particulares quando necessário: Anotações sobre o que foi observado durante a análise do componente ou subsistema de modo a ajudar a melhorar a qualidade da engenharia. Pode ser que determinado componente apresente inúmeras falhas e a solução seja trocar por outro modelo ao invés de ficar analisando o modo de falha sempre do mesmo componente.

4.2.1 Análise do Equipamento (*hardware*)

Esta abordagem lista todos os itens dos equipamentos e analisa seus possíveis modos de falha. A verificação ocorre de “baixo para cima” iniciando no item mais baixo até o mais alto da hierarquia do sistema. Esta análise deve ser realizada depois do projeto estar terminado e possuir pelo menos um desenho mecânico com todas as partes definidas. Para realizar a FMEA de *hardware* são necessários:

1. Conhecimento total do sistema;
2. Diagrama de blocos funcional;
3. Desenhos de engenharia;
4. Definição dos níveis de hierarquia do sistema.

A análise deve identificar cada peça com um número de identificação no processo na tabela de FMEA.

Os efeitos de cada modo de falha são determinados pela propagação da falha por cada nível de hierarquia do sistema.

A informação obtida pelo relatório de FMEA de hardware deve incluir uma lista de riscos a serem eliminados ou reduzidos, lista de pontos críticos e uma lista de falhas que não são detectáveis por inspeção visual ou métodos de “*self test*” do equipamento.

4.2.2 Análise Funcional

Esta abordagem considera a função de cada item. Cada função pode ter mais de um modo de falha associado. Como esta análise é realizada no início da fase de projeto e ainda não possui equipamentos definidos com seus desenhos de engenharia, ela deve ser realizada baseada em diagrama de blocos do sistema. Assim, para realizar a FMEA funcional são necessários:

1. Definição do sistema e a discriminação funcional;
2. Diagrama de blocos do sistema;
3. Teoria de operação;
4. Regras base e pressupostos;

5. Especificação de software, se aplicável.

A análise dos modos de falha (MF) e seus efeitos será completa determinando-se o potencial de modos de falha e as causas para cada função do sistema. A probabilidade do modo de falha e a taxa de falha modal podem então ser aproximadas se uma análise de criticidade for necessária. A probabilidade do MF é uma porcentagem do tempo em que a função irá falhar em um determinado modo. A taxa de falha modal é definida como uma taxa de falha funcional (falha por milhões de horas) multiplicada pela probabilidade do MF ocorrer.

Da mesma forma que a FMEA de hardware, os efeitos são propagados para cima até o nível mais alto da hierarquia do sistema.

4.3 FMECA

A FMECA foi originalmente desenvolvida pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) para melhorar e avaliar a confiabilidade dos equipamentos do programa espacial. A norma mais utilizada neste caso é a MIL-STD-785 [21], intitulada “*Reliability Program for system and Equipment Development and Production*” a qual define na sua “*task*” 204 os procedimentos para a aplicação da FMECA.

O propósito da FMECA [22] é identificar as fraquezas de projeto pelas considerações documentadas por meio de análise. Como por exemplo, todos os meios possíveis que um componente poder falhar, as causas e os efeitos de cada falha.

Praticamente o que diferencia a FMECA da FMEA é a análise de criticidade (CA) que faz parte do procedimento da FMECA e será abordada a seguir.

4.4 Análise de Criticidade (CA)

Esta análise deve ser realizada após a avaliação de FMEA e deve possuir as mesmas identificações dos itens utilizadas na análise anterior fazendo com que o conjunto das duas análises seja chamado de FMECA.

A CA faz parte do processo de design do projeto e tem como objetivo medir a significância dos efeitos dos modos de falha no sucesso da operação e segurança do sistema.

Alguns indicadores são introduzidos nesta análise, como o α e β . O α é a probabilidade em fração decimal que um determinado item irá falhar dado um modo de falha específico; o β é a probabilidade condicional que o efeito da falha resultará na classificação de criticidade indicada, dado que o modo de falha ocorreu.

A análise CA pode ser aplicada de forma qualitativa ou quantitativa dependendo da quantidade de informações que se tem sobre o sistema em questão.

A abordagem qualitativa deve ser usada quando não é possível determinar as taxas de falha dos componentes, e a quantitativa deve ser usada quando há dados suficientes de histórico de falhas em operação para se calcular a taxa.

4.4.1 Abordagem Quantitativa

A fonte de dados para as taxas de falhas utilizada nesta análise deverá ser a mesma de outras análises já realizadas ou ainda por realizar. As taxas de falha e os ajustes das taxas de falha devem seguir os procedimentos citados a seguir:

- a) MIL HDBK-217 [23] deve ser a fonte primária de dados para as taxas de falha de peças eletrônicas. Tanto as taxas de falha quanto os ajustes das taxas de falha devem ser identificados;
- b) Quando as peças são similares às listadas na MIL HDBK-217, a base de taxa de falha deve ser selecionada da mesma e deverá incluir todos os modos de falha;

c) As taxas de falha que não estão inseridas na norma citada devem ser selecionadas de outra fonte de dados confiável, onde, estas fontes alternativas podem ser:

- Outras normas ou *handbooks* específicos;
- Dados de testes realizados pelas empresas fabricantes;
- Dados de testes realizados pelo contratante;
- Experiência prévia com o equipamento;
- Outras fontes de dados confiáveis.

Com esses valores em mãos é possível calcular o número de Criticidade do modo de falha que é dado pela fórmula:

$$C_m = \beta \alpha \Lambda_p t \quad (4.1)$$

Onde:

$C_m \rightarrow$ Criticidade do modo de falha

$\beta \rightarrow$ Probabilidade condicional de perda da missão

$\alpha \rightarrow$ Probabilidade de ocorrer o modo de falha

$\Lambda_p \rightarrow$ Taxa de falha da peça em milhões de horas de operação

$t \rightarrow$ Duração da fase expressa em horas ou número de ciclos de operação.

O índice α é chamado de “Probabilidade modal de falha” porque em casos onde há mais de um modo de falha presente ele representa a probabilidade de falha de cada MF, de forma que a soma de todos os alfas do componente deve ser igual à 1. O exemplo a seguir é aplicado para uma válvula hidráulica:

Tabela 3 - Distribuição normalizada de Modo de Falha para FMECA

Equipamento	Modo de falha	α
Válvula hidráulica	Vazamento	0,77
	Travada aberta	0,12
	Travada fechada	0,11
Soma total		1 ou 100%

A taxa modal de falha Λ_m é a fração dos mecanismos de falha totais baseado na probabilidade de ocorrência daquele modo de falha. A soma dos Λ_m para um item será igual à taxa de falha daquele item.

$$\Lambda_m = \alpha \Lambda_p \quad (4.2)$$

Para exemplificar, tomaremos a mesma válvula hidráulica e assumiremos que este componente tem uma taxa de falha $\Lambda_p = 0,12345$ e assim fica definida a taxa modal de falha como na tabela 4.

Tabela 4 - Exemplo da taxa modal de falha

Equipamento	Modo de falha	α	Λ_p	Λ_m
Válvula hidráulica	Vazamento	0,77	0,12345	0,0950565
	Travada aberta	0,12	0,12345	0,014814
	Travada fechada	0,11	0,12345	0,0135795
Soma total		$\Lambda_m \text{ total} = 0,12345$		

A taxa modal de falha quantifica a taxa em que cada modo de falha pode ocorrer para compor a taxa de falha total do componente.

O índice β é chamado de probabilidade do efeito da falha. Ele representa o julgamento do analista para a chance da “perda” da missão ocorrer. Este índice tem seus valores tabelados como na tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Definição de valores de Beta.

Efeito da falha	β
Perda ocorreu	1
Perda provável	>0,10 até <1
Perda possível	>0 até 0,10
Nenhum efeito	0

Exemplo de aplicação:

Tabela 6 - Exemplo de aplicação

Modo de falha	Efeito da falha	β
Travamento do freio	Trem desliza nos trilhos e para	0,9
	Trem descarrila	0,1

A severidade destes dois efeitos de falha é muito diferente, o número de criticidade para o modo de falha pode ser ponderado na probabilidade deste efeito ocorrer. Usando os freios do trem como exemplo e assumindo que $\Lambda_p=0,1$ falhas por milhão de horas, $\alpha=0,5$ e $t=20$ horas, o C_m pode ser calculado através da equação 4.1.

$$C_m = \beta \alpha \Lambda_p t$$

$$C_{m1} = (0,9)(0,5)(0,1 \times 10^{-6})(20)$$

$$C_{m1} = 9 \times 10^{-8} \quad \text{para o efeito de falha \#1 e,}$$

$$C_{m2} = (0,1)(0,5)(0,1 \times 10^{-6})(20)$$

$$C_{m2} = 1 \times 10^{-8} \quad \text{para o efeito de falha \#2.}$$

Portanto o C_m total deve ser calculado como a soma dos C_m 's.

$$C_{m \text{ total}} = 9 \times 10^{-8} + 1 \times 10^{-8} = 1 \times 10^{-7}$$

Como foi mostrado, o índice de criticidade é definido como:

$$C_r = \sum_{n=1}^J (\beta \alpha \Lambda_p t)_n \quad , \text{ onde } n=1,2,3,\dots,j \quad (4.3)$$

4.4.2 Abordagem Qualitativa

Para esta abordagem as taxas de falha não são utilizadas, pois não estão disponíveis. Ao invés disso, como indicativo, são utilizados valores de frequência de falha baseados em experiência anterior de especialistas. Estes valores indicativos são discriminados na tabela 7.

Tabela 7 - Classificação de frequência de falha MIL HDBK 217

Tipo	Descrição	Probabilidade de falha
Nível A (Frequente)	Alta probabilidade de ocorrência durante o intervalo de operação	Maior que 0,20
Nível B (Razoavelmente provável)	Uma probabilidade moderada de falha durante o tempo de operação	Entre 0,1 e 0,2
Nível C (Ocasional)	Uma Probabilidade ocasional de falha no tempo de operação em pelo menos 1 modo de falha.	Entre 0,01 e 0,1
Nível D (Remota)	Uma falha pouco provável de ocorrer durante o intervalo de operação.	Entre 0,001 e 0,01
Nível E (Extremamente improvável)	Uma probabilidade de ocorrência de falha praticamente nula. Durante o tempo de operação.	Menor que 0,001

É possível observar que apesar de haver uma probabilidade de falha associada a cada frequência de ocorrência, não é possível utilizar esta tabela para o cálculo da criticidade.

Para uma análise qualitativa completa não basta apenas uma classificação de frequência de ocorrência de falha, mas é fundamental que seja possível calcular um número final e para isso se faz necessário alocar pesos para cada frequência. SUCENA (2001, p.131 e 134) [24], propõe classificação e peso correspondente da probabilidade de ocorrência de falha (PPOF) mostrados na tabela 8.

Tabela 8 - Classificação e Peso da Probabilidade de Ocorrência de Falha / FONTE: SUCENA (2001, p.131 e 134)

Classificação	Peso	Descrição	Taxa de falhas
Quase nula	1	A falha é improvável de acontecer	<1 falha em 10 ⁶ horas
Baixa	2	Poucas falhas acontecem	1 falha entre 10 ⁶ e 20.000 horas
	3		1 falha entre 20.000 e 4.000 horas
Moderada	4	Falhas ocasionais acontecem	1 falha entre 4.000 e 1.000 horas
	5		1 falha entre 1.000 e 400 horas
	6		1 falha entre 400 e 80 horas
Alta	7	Falhas repetitivas acontecem	1 falha entre 80 e 40 horas
	8		1 falha entre 40 e 20 horas
Muito alta	9	Falhas são quase inevitáveis	1 falha entre 20 e 8 horas
	10		1 falha entre 8 e 2 horas

O índice de Severidade, segundo a norma MIL STD 1629, é dividido em quatro categorias de severidade e cada uma associada de acordo com a gravidade do efeito da falha. A severidade é utilizada na análise de criticidade e, portanto, na FMECA. A tabela abaixo mostra as definições de severidade de acordo com a norma MIL STD 1629.

Tabela 9 - Matriz de nível de severidade

Descrição	Categoria	Definição
Catastrófico	I	Morte ou perda do sistema.
Crítico	II	Ferimento grave, doença ocupacional ou dano grave ao sistema.
Marginal	III	Ferimentos sem gravidade, doença ocupacional ou danos menores ao sistema.
Mínimo	IV	Ferimentos leves, doença ocupacional ou danos menores ao sistema.

Na análise quantitativa, depois de calculado o número de Criticidade C_m , é possível montar uma matriz como mostrada na figura 12. A chamada matriz de Criticidade possui no seu eixo X o índice de severidade e no eixo Y o índice de criticidade C_m da análise quantitativa. Quanto maior for o deslocamento de um item no sentido de crescimento da diagonal, mais urgente se torna a correção. É possível montar a mesma matriz utilizando a severidade e a probabilidade de ocorrência de falha (PPOF) da análise qualitativa.

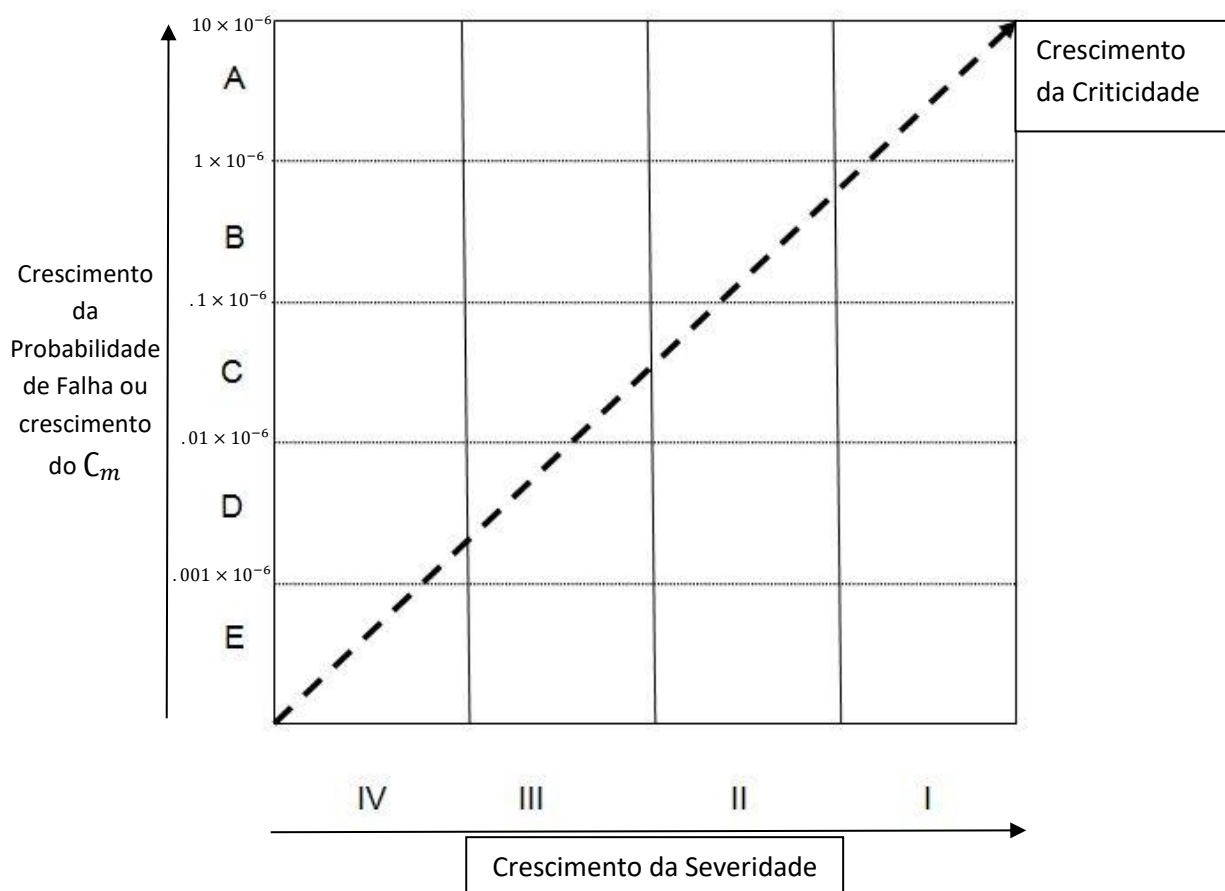


Figura 12 - Matriz de Criticidade

Outras classificações de severidade podem ser utilizadas.

A norma BS-5760 [25] classifica a severidade do efeito da falha, conforme exposto a seguir:

- A. Severidade 5: quando a falha provoca destruição ou degradação definitiva do equipamento, com parada da capacidade funcional do equipamento e possibilidade de perda de vidas humanas;

- B. Severidade 4: quando a falha danifica o equipamento, provocando de 40% a 80% de perda da capacidade do sistema e provoca grandes ferimentos a funcionários e usuários e danos a longo prazo;
- C. Severidade 3: quando há degradação importante da funcionalidade do equipamento com aumento substancial do trabalho do operador, 10% a 40% de perda da capacidade do sistema e possibilidade de pequenos ferimentos com facilidade de recuperação das pessoas;
- D. Severidade 2: quando a falha provoca pequena degradação da condição funcional do equipamento, perda abaixo de 10% da capacidade do sistema e possibilidade de pequenos ferimentos às pessoas e;
- E. Severidade 1: quando a falha não provoca efeito na capacidade funcional do equipamento e do sistema nem possibilidade de ferimento em pessoas.

Esta classificação é uma ferramenta que não permite calcular um índice de severidade, pois não possui peso associado às categorias. SUCENA (2001, p.130 e 134) [24] subdividiu estas categorias e alocou pesos para cada faixa de severidade (PSF) na sua análise de alocação de recursos financeiros para manutenção de componentes do sistema ferroviário. A classificação é exposta na tabela 10 a seguir.

Tabela 10 - Classificação e Peso da Severidade das Falhas/ FONTE: SUCENA (2001, p.130 e 134)

Classificação	Peso	Descrição
Nula	1	A falha não tem efeito real no sistema não afetando o usuário.
Leve	2	A falha causa leves transtornos ao cliente não afetando o nível de serviço do sistema.
Baixa	3	A falha causa pequenos transtornos ao cliente afetando pouco o nível de serviço do sistema.
Moderada	4	A falha causa relevantes transtornos ao cliente afetando o nível de serviço do sistema.
Média	5	A falha causa relevantes transtornos ao cliente deixando-o desconfortável, degradando o nível de serviço do sistema.
Média/Alta	6	A falha causa irritação ao cliente deteriorando sensivelmente o nível de serviço.
Alta	7	A falha causa alto grau de insatisfação ao cliente devido ao nível de deterioração do nível de serviço. Não envolve riscos à segurança dos usuários nem descumprimento dos requisitos

		legais.
Muito alta	8	A falha envolve alto risco à segurança dos equipamentos e leve risco à segurança dos usuários, não causando descumprimento de requisitos legais.
Altíssima	9	A falha envolve alto risco à segurança operacional e dos usuários causando descumprimento legal de requisitos legais.
Grave	10	A falha promove acidente com graves proporções.

Outro índice utilizado por Sucena [24] e Coimbra [26] foi a Probabilidade de detecção da falha (PPDF) como um dos indicativos da criticidade. Sustentam que além da severidade e da frequência de ocorrência, o índice de detecção se torna extremamente importante em grandes sistemas como a ferrovia onde pode haver falhas ocultas. Se a probabilidade de detecção de uma falha for baixa é possível que este evento de risco evolua para uma situação de grande perigo e, portanto, deve-se dar alguma atenção a esta questão. Da mesma forma que os dois parâmetros anteriores, este necessita de um peso associado para que seja possível calcular o índice de criticidade qualitativo. A tabela 11 a seguir distribui os pesos relacionados à probabilidade de detecção de falhas segundo Sucena.

Tabela 11 - Probabilidade de detecção de Falhas/ FONTE: SUCENA (2001, p.132)

Classificação	Peso	Descrição
Muito alta	1	A falha é detectada durante o projeto, fabricação, montagem ou na operação.
Alta	2	A falha é detectada durante a fabricação, montagem ou na operação.
Média/alta	3	A falha é detectada pela montagem ou pelos processos de controle na operação.
Moderada	4	A falha é detectada pelos processos de controle na operação
Média	5	Existe 50% de chance da falha ser detectada na operação
Média/baixa	6	Há possibilidade de detecção da falha pelos processos de controle na operação.
Baixa	7	Há alguma possibilidade de detecção da falha pelos processos de controle operacionais.
Muito baixa	8	É improvável a detecção da falha pelos processos de controle na operação.

Baixíssima	9	Os sistemas de controle na operação não estão apropriados para detecção da falha.
Nula	10	A falha não será detectada com certeza

Através dos já mencionados: pesos de probabilidade de ocorrência de falhas (**PPOF**), pesos de severidade de falhas (**PSF**) e pesos de probabilidade de detecção de falhas (**PPDF**), se calcula o índice de criticidade (**IC**) ou o também chamado (**NPR**) Número de Prioridade de Risco.

$$IC = PPOF \times PSF \times PPDF \quad (4.4)$$

4.4.3 Considerações

Será utilizada nesta dissertação a expressão (4.4) para a análise qualitativa do projeto Maglev-Cobra. A análise qualitativa será empregada pelo fato de não haver dados catalogados sobre todas as peças utilizadas neste projeto, dificultando assim a rastreabilidade dos valores de taxa de falhas e probabilidades de falhas. Como não há documento que especifique a marca e o tipo de alguns componentes não há como saber qual é a taxa de falha da peça mesmo que ela conste em literatura específica.

Para exemplificar, a figura 13 mostra a página 60 da Ref. [27] que lista a taxa de falhas para um conector coaxial.

A dificuldade da análise quantitativa é: qual dado de taxa de falha utilizar quando não há especificação definida do componente?

2-30 Part Summaries

NPRD-91

Part Description	Qual Lev	App Env	Data Source	Fail Per E6 Hours	Total Failed	Operating Hours (E6)	Detail Page
Connector, Coaxial (continued)							
Com	GF	23015-000	<	0.0205	0	48.7000	3-75
				0.0907	0	11.0265	3-75
Mil	A	25199-000	<	0.0373	0	27.5620	3-75
				0.0363	0	0.2067	3-75
AIA	23035-000	<	AIF	4.8388	0	0.9018	3-75
				1.1089	0	0.1128	3-75
AIT	17189-000	<	AU	8.8652	0	0.0655	3-75
				0.0153	1	49.5310	3-75
13655-000	23015-000	<	NPRD-106	0.0202	0	0.4750	3-75
				2.1053	0	1.6533	3-75
AUA	23035-000	<	AUF	0.6049	1	0.9363	3-75
				10.6808	0	0.0058	3-75
GF	14434-000	<	23006-000	0.1654	0	6.0445	3-75
				0.0437	0	22.8756	3-75
23015-000	<	NPRD-067	<	0.0072	0	138.9375	3-75
				0.1857	0	5.3850	3-76
GM	18283-000	<	NS	14.7872	0	0.0676	3-76
				0.0174	0	25.8251	3-76
23005-000	23024-000	<	25199-000	0.0387	0	3.5989	3-76
				0.2779	0	0.3550	3-76
25199-000	NPRD-106	<	CF	2.8169	0	27.8300	3-76
				0.0359	0	0.0310	3-76
10219-034	23015-000	<	25199-000	0.0530	0	18.8700	3-76
				0.6429	0	1.5555	3-76
25199-000	NPRD-106	<	Unk	0.1301	0	7.6840	3-76
				0.2425	0	4.1240	3-76
A	14182-001	<	ARW	0.7516	-	-----	3-76
				1.0310	-	-----	3-76
14182-001	G	<	GF	10.0000	-	-----	3-76
				0.5700	0	66.5060	3-76
25199-000	14182-001	<	NSB	0.0150	0	-----	3-76
				1.3820	-	-----	3-76
14182-001	SF	<	14182-001	0.7400	-	-----	3-76
				0.0300	-	-----	3-76

Figura 13 - Fonte de dados para peças mecânicas e não eletrônicas Ref.[27]

Capítulo 5 - Introdução à utilização da EN-50126 no Projeto Maglev

Neste capítulo será abordada a forma como os dados do projeto Maglev devem ser alocados para satisfazer os requerimentos da norma utilizada nas fases iniciais.

5.1 Fase1 – Conceito

#Tarefas gerais:

- Estabelecer o escopo e o propósito do projeto;
- Definir o projeto de Conceito;
- Estabelecer equipe;

#Entradas:

As entradas devem incluir toda informação relevante e, onde apropriado, dados necessários para atingir os requerimentos desta fase, como por exemplo as declarações de escopo e propósito do projeto.

5.1.1 Elaboração da fase 1 (requerimento 1)

- i. O escopo, contexto e propósito do sistema;
- ii. Ambiente do sistema incluindo:
 - Questões físicas;
 - Potenciais questões de interface do sistema;
 - Questões sociais;
 - Questões políticas;
 - Questões legislativas;
 - Questões econômicas;
- iii. As implicações gerais do RAM's do sistema;

O escopo:

Este projeto propõe a construção e operação de uma linha experimental de testes para o veículo de levitação magnética supercondutora denominado Maglev Cobra no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro utilizando recursos financeiros públicos e

privados. As características gerais são descritas a seguir e a definição dos domínios de interesse é representada na figura 14.

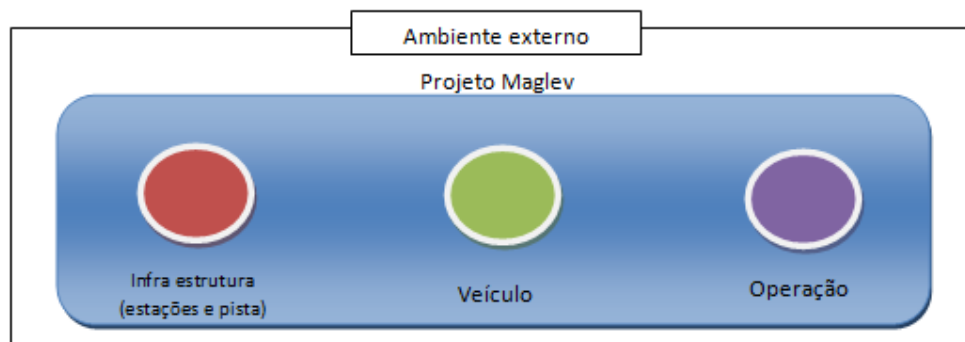


Figura 14 - Escopo

Infraestrutura:

- A pista de testes possui extensão de 187 metros em linha reta ligando dois prédios existentes com desnível de 1,3 metros entre ambos.
- Possui duas estações para embarque e desembarque de passageiros, uma em cada extremidade da linha experimental;
- Tanto a pista quanto as estações são elevadas, portanto não interferem no tráfego de veículos e pessoas abaixo da mesma, além de reduzir o risco de travessias na pista e objetos depositados nos trilhos;
- Os trilhos utilizados neste sistema de transporte são compostos de ímãs de terras raras e ferro montados em segmentos de um (1) metro de forma a concentrar maior densidade de fluxo magnético na sua face superior;
- A via elevada deve ser construída com estruturas leves com menor impacto visual e ambiental;
- Toda rede elétrica e de comunicação deve passar pela estrutura;
- Deve possuir pelo menos 4,5 metros de altura em passagens sobre ruas;
- As estações devem possuir duas saídas diferentes e área de circulação para a quantidade de passageiros a ser considerada neste veículo;

Veículo:

- O veículo é tracionado por motor elétrico linear onde a parte não energizada do motor faz parte da pista e sua estrutura deve ser fixada no leito da via;
- O veículo levita a partir da interação entre supercondutores refrigerados e os trilhos magnéticos. Para isso é necessário fornecimento de nitrogênio líquido e infraestrutura de armazenamento;
- O veículo utilizado deve ser o mais leve possível visando o maior aproveitamento da força de levitação para o transporte de passageiros (aproximadamente 20);
- Caso haja falta de energia ou impossibilidade de movimentação do veículo, deve ser possível o desembarque na pista e a condução segura dos passageiros até a estação mais próxima;
- A alimentação de energia para a tração do motor deve ser feita de forma externa sendo isolada e segura;
- O veículo deve possuir sistema de segurança para o caso de falha na levitação;
- Deve ser fabricado com materiais anti chama ou auto extingüível;
- Deve possuir freio de estacionamento que não dependa de eletricidade;

Operação:

- Os testes devem ser realizados em baixa velocidade respeitando acelerações de no máximo 1m/s^2 ;
- A condução do veículo deve ser realizada por um condutor familiarizado com o sistema de operação;
- Para a operação segura do veículo deve haver redundância nos controles de tração e frenagem;
- O condutor deve ser capaz de parar o veículo mesmo com falha nos sistemas de operação;
- A velocidade máxima deve ser limitada;
- O limite de pessoas deve ser estabelecido com base nos critérios de segurança de levitação a serem definidos;

Definição da equipe:

Tabela 12 - Lista da equipe

Lasup	
Nome	Função/Cargo
Richard M. Stephan	Coordenador
Felipe S. Costa	Eng. Mecânico
Roberto A. Oliveira	Eng. Eletricista
Laercio Simas	Eng. Eletricista
Rubens de Andrade	Físico
Severina Guedes	Assuntos Financeiros
Edeval Gangá	Técnico em Mecânica
Elkin F. Rodriguez	Eng. Eletrônico
Arquitetura	
Fernanda Metello	Arquiteta
Empreiteira	
OAS	Construtora
Projeto Civil	
Tecton Engenharia	Eng. Civil
Fornecedor de estruturas metálicas	
Eneltec	Consultora
Metalfenas	Montadora

O propósito do sistema:

A construção de uma linha de testes em tamanho real com um veículo composto de múltiplos vagões tem por objetivo pôr em prova a tecnologia desenvolvida no Laboratório de Aplicação de Supercondutores (LASUP). Esta instalação de testes permite testar equipamentos em ambiente relevante lidando com problemas reais de operação como, por exemplo: exposição à condições climáticas variadas, efeitos térmicos no veículo e na pista, movimentação de pessoas no interior do veículo, ciclos de aceleração e frenagem, teste de equipamentos elétricos quanto à sua confiabilidade, desalinhamento de eixos, qualidade de fabricação de peças, problemas de software em situações diversas, avaliação da vibração e conforto interno com diferente quantidade de passageiros, ruído, segurança de operação, alterações no perfil de levitação,

investigação de falhas, desenvolvimento de dispositivos de segurança, abastecimento de fluido criogênico, entre outros.

Com um sistema físico em escala real é possível avaliar qualitativamente o desempenho de equipamentos utilizados assim como estratégias traçadas em laboratório aplicar melhorias e desenvolver novas técnicas para problemas não abordados na fase conceitual. É possível também avaliar custos, consumo, desgaste de peças, vida útil de equipamentos, manutenção, receber avaliação de passageiros e mostrar ao público e potenciais investidores uma nova tecnologia em operação.

Ambiente:

O local escolhido para a construção da via elevada e suas estações pertence à UFRJ e se localiza entre dois prédios já existentes no centro de tecnologia da Ilha do Fundão onde funciona o LASUP. Estes dois prédios se encontram afastados por cerca de 180 metros e em cotas de elevações distintas, de forma que para sair do nível do segundo andar do prédio aqui denominado CT1 e chegar no segundo andar do prédio CT2 é necessário vencer uma elevação de 1,3 metro. A figura 15 ilustra esta situação.

A via elevada atravessa pelo alto dois estacionamentos e uma rua onde há tráfego nos dois sentidos.

A proposta de ligação entre esses dois prédios visa atender à circulação diária de pessoas entre esses ambientes, além de ser um ponto estratégico de visibilidade para visitas de importantes comissões à diretoria da COPPE.

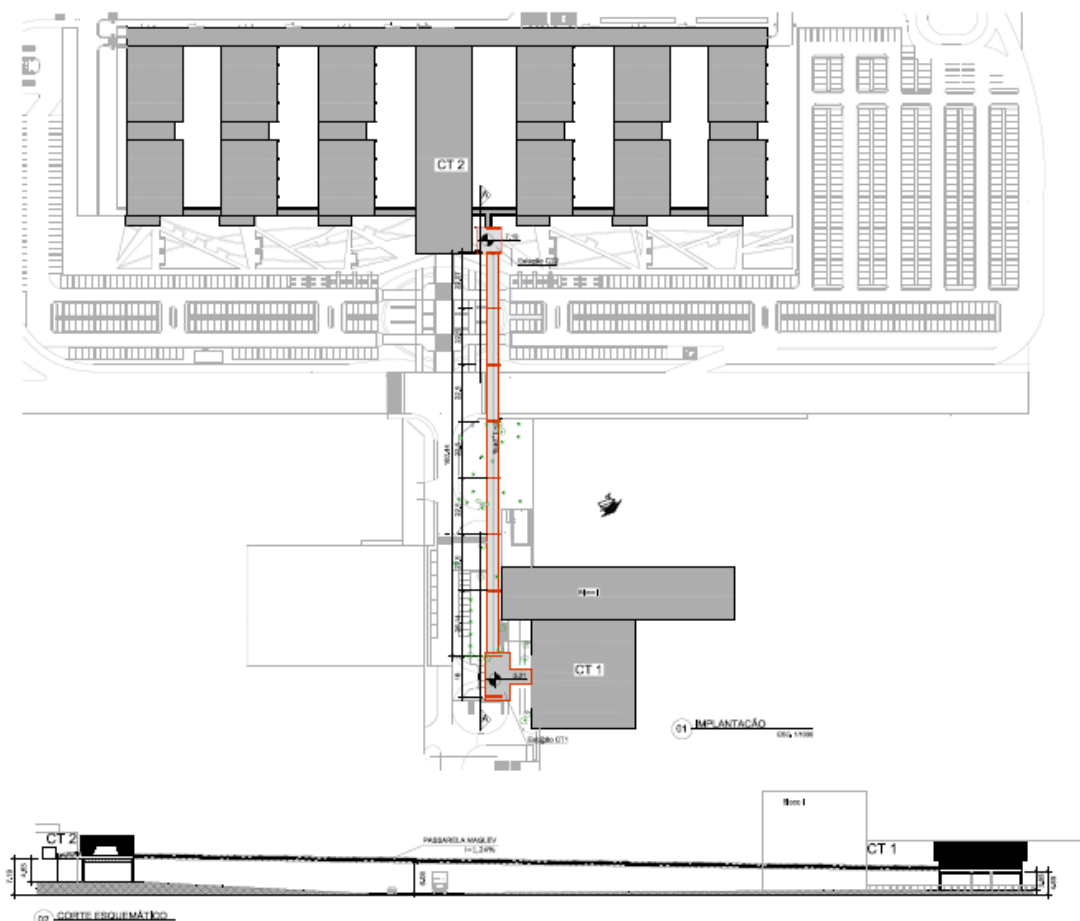


Figura 15 - Ligação Ct1-Ct2

Importante observar que não foi necessário nenhum desmatamento e nem desapropriações para esta obra.

O sistema proposto não terá nenhuma interação com outros sistemas de transporte e se caracteriza por uma única linha de transporte entre dois prédios com objetivo de testes funcionais, servindo eventualmente para viagens demonstrativas e sem nenhum custo para seus passageiros.

Por se tratar de um veículo experimental de testes não haverá concessão de operação nem sistema de bilhetagem.

As empresas que desejarem investir nesta fase de desenvolvimento desta tecnologia terão vantagens quando o produto estiver capaz de ser comercializado e, portanto, poderão participar do empreendimento no futuro. Além disso, por questões de marketing podem ter seu nome associado ao primeiro veículo de levitação da América Latina.

Por força da legislação todos os passageiros que viajam no veículo em viagens demonstrativas devem tomar ciência do caráter experimental e assinar um termo de responsabilidade no qual firmam conhecimento dos riscos assumidos.

Deve haver também uma equipe de manutenção disponível para cuidar dos equipamentos e manter as instalações e veículo prontos para funcionamento sempre que necessário. Outra função dessa equipe é realizar inspeções e melhorias de acordo com o especificado pelo setor de engenharia.

5.1.2 Requerimento 2

- i. Revisar as implicações de RAMS de qualquer análise financeira do sistema;
- ii. Revisar as implicações de RAMS de qualquer estudo de viabilidade do sistema;

Visto que a análise atual ocorre após a implementação do projeto, não há implicação na análise financeira e estudo de viabilidade.

5.1.3 Requerimento 3

- i. Identificar fontes de perigos que possam afetar a performance de RAMS do sistema, incluindo:
 - Interação com outros sistemas;
 - Interação com humanos;

As fontes de perigo de ordem humana podem surgir na medida em que pessoas não autorizadas e desinformadas tem acesso à ambientes não autorizados como a pista e as instalações de abastecimento de nitrogênio líquido.

A fim de mitigar esses riscos, todas as instalações devem ter acesso restrito, e a pista deve ser isolada do acesso ao público. Só devendo ser utilizada com orientação de membros da equipe com instruções de segurança.

5.1.4 Requerimento 4

- i. Informações sobre requerimentos anteriores de RAMS e performance anteriores de RAMS de sistemas similares;
- ii. Identificar fontes de perigo para o desempenho do RAMS;
- iii. Atual autoridade de políticas de segurança de Ferrovia e níveis a serem alcançados;
- iv. Legislação de segurança;

Não há sistema similar com veículo sobre trilho de ímãs no mundo e portando não há objeto de comparação.

As diretrizes de segurança a serem cumpridas pelo Maglev devem seguir o Relatório de Segurança 6 da INECO. Que reúne as práticas mais atuais a serem seguidas pelo transporte ferroviário brasileiro.

A legislação de segurança vigente segue a tabela 2 da ABNT citada anteriormente.

5.1.5 Requerimento 5

- i. Definir o escopo dos requerimentos de gerência para as tarefas de RAMS do ciclo de vida.

O gerenciamento é realizado através de reuniões semanais nas quais são discutidos os itens pertinentes à evolução do projeto

5.2 Fase 2 – Definição do sistema e Condições de Aplicação

#Tarefas gerais

- Estabelecer o perfil da missão do Sistema;
- Preparar a descrição do Sistema;
- Identificar as estratégias de operação e manutenção do sistema;
- Identificar as condições de operação;
- Identificar as condições de manutenção;
- Identificar as influências das limitações de infraestrutura existente.

#Entradas

As entradas desta fase devem incluir toda informação relevante, e quando apropriado, dados necessários para alcançar os requerimentos desta fase, incluindo os relatórios da fase 1.

5.2.1 Requerimento 1 (item 6.2.3 EN 50126)

- i. O perfil da missão do sistema, incluindo:
 - Requerimentos de desempenho;
 - Níveis de RAM's a serem alcançados;
 - Estratégias e condições de longa operação;
 - Estratégias e condições de manutenção à longo prazo;
 - Considerações sobre a vida do sistema, incluindo tópicos relacionados ao custo do ciclo de vida;
 - Considerações logísticas;
- ii. Os limites do Sistema, incluindo:
 - Interfaces com o ambiente físico;
 - Interfaces com outros sistemas tecnológicos;
 - Interfaces com humanos;
 - Interface com outras ferrovias;
- iii. O escopo de condições de aplicação que influenciam no sistema, incluindo:

- Limitações impostas por infraestrutura existente;
 - Condições de operação do sistema;
 - Condições de manutenção do sistema;
 - Considerações sobre a logística de suporte;
 - Revisão de experiências passadas de sistemas similares;
- iv. O escopo da análise de risco do sistema, incluindo a identificação de:
- Perigos inerentes ao processo a ser controlado;
 - Perigos do ambiente ao qual o sistema está exposto;
 - Perigo de segurança (patrimonial/publica);
 - A influência de eventos externos;
 - Contornos do sistema a ser analisado;
 - Influência no RAMS de limitações de infraestrutura pré-existente.

i. O objetivo é que após sucessivos testes e correções de problemas apresentados, o referido sistema opere diariamente das 9:00 até as 17:00 em velocidade de até 15 km/h realizando viagens em intervalos de 5 minutos entre os dois blocos. Transportando o máximo de pessoas em segurança.

Para esta disponibilidade faz-se necessário jornadas de trabalho nos finais de semana para manutenção preventiva ou corretiva.

A manutenção deverá ser realizada através de procedimentos rotineiros a fim de oferecer continuidade no volume de tráfego e reduzir a degradação do sistema e evitar a interrupção do serviço.

Caso a jornada de trabalho não possa ocorrer no final de semana, o veículo deverá sofrer manutenção em outro dia da semana.

Para que o sistema possa permanecer mais tempo sem manutenção devem ser avaliados os índices de falha e desgaste dos componentes. Caso o nível de confiabilidade seja adequado, a manutenção poderá ser feita quinzenalmente ou de acordo com o estabelecido para a manutenção preventiva.

O pleno conhecimento do sistema e a escolha de melhores componentes e/ou procedimentos aumentará a vida útil dos equipamentos evitando possíveis falhas. Essa experiência só poderá ser adquirida com a operação do sistema de forma exaustiva.

A escolha por itens presentes no mercado nacional deverá ser sempre preponderante para uma rápida reposição no estoque. A dependência do mercado internacional pode acarretar em custos mais elevados e a maiores tempos de espera pelo produto.

ii. O sistema está limitado a trafegar sobre seus trilhos e não há nenhum aparelho de mudança de via de forma que seu percurso é somente uma linha reta com início na estação CT1 e fim na estação CT2. Há uma barreira metálica no início e no fim da linha para evitar que o veículo ultrapasse os limites físicos da estação. Esta proteção só será utilizada em caso de acidente por perda de controle de tração ou freio.

iii. A pista de operação é elevada e se apoia em pilares de sustentação, o que mantém a via a aproximadamente 5 metros de altura do tráfego de pessoas e veículos. Além disso, as estações possuem portão de embarque que só deve se abrir quando o veículo se encontra na estação. Dessa forma, a interface com pessoas só ocorre no momento do embarque e desembarque. O único pessoal autorizado a trabalhar na área de circulação de veículo é o pessoal da equipe de manutenção que possui indicação visual de onde o veículo se encontra, visto o tamanho reduzido da pista (200metros).

No trajeto implantado não há curvas horizontais, somente inflexões verticais ocasionadas pelo desnível entre estações conforme a figura 11.



Figura 16 - Linha de Operação

O veículo deve manter seus criostatos próximos ao trilho (10 a 20 mm) e não há suspensão para compensar a distância. Por esse motivo as conexões entre vagões devem permitir angulação entre unidades adjacentes para que o veículo vença a inflexão sem afastar nenhum criostato por mais de 10 mm, condição mostrada na figura 17. Se a conexão fosse rígida, os criostatos afastados do trilho perderiam sustentação e o veículo ficaria apoiado pelos criostatos das extremidades, os sobrecarregando.

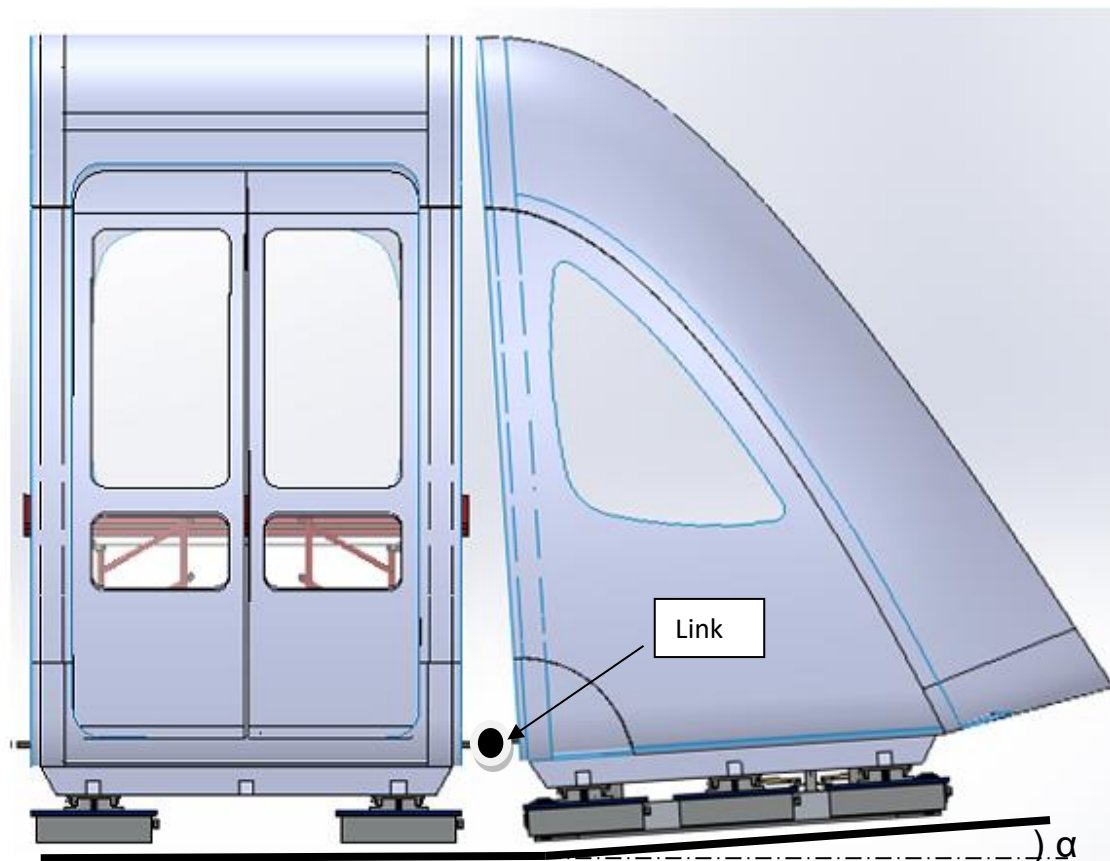


Figura 17 - Liberdade de angulação entre vagões

Algumas condições de operação do sistema:

Tabela 13 - Condições de operação

Limite de peso	8000 N carga por vagão
Limite de velocidade	Necessita de estudo
Vento lateral limitante	Necessita de estudo
Chuva abundante com lâmina de água	Lamina de 50mm
Altura de levitação	8 a 20 mm
Distância percorrida	Depende da autonomia
Limite de desalinhamento	Necessita de estudo

Um limitador de viagens de longa duração é o consumo das baterias internas. Elas servem para alimentar os sistemas de monitoramento e aquisição de dados. Deve-se criar um meio de recarregar as baterias enquanto o veículo anda, caso contrário, a distância a ser percorrida dependerá da carga nas baterias.

Outro limitante é o volume de nitrogênio líquido no interior dos criostatos, caso a taxa de evaporação seja muito alta, a duração da refrigeração das cerâmicas será comprometida e o efeito de levitação poderá cessar. Deve-se criar dispositivo de refrigeração com confiabilidade e longa duração.

iv. Para o escopo da análise de risco é preciso listar todos os perigos inerentes ao processo de operação de um veículo sobre trilhos. No qual incluem as interações:

- veículo/passageiro;
- Veículo/estação;
- Passageiro/estação;

Os Perigos do ambiente ao qual o sistema está exposto se resumem a eventos meteorológicos como sol, chuva, raios e vento. Que são eventos externos para os quais não há controle.

5.2.2 Requerimento 2 (classificação)

- i. Análise preliminar de RAM para os alvos;
- ii. Identificação preliminar de perigos;
 - Identificação de subsistemas associados ao perigo;
 - Identificar tipos de eventos que iniciam acidentes incluindo falha de componentes, falha de procedimentos, erro humano e mecanismos de falha dependente;
 - Definir critério inicial de tolerância ao risco.

Para os requerimentos desta fase é preciso especificar os subsistemas a fim de avaliar quais são os riscos inerentes associados. Desta forma, a tabela 14 de hierarquia de sistemas mostra os principais sistemas do veículo. É em cima dessa tabela que é definido o sistema Maglev.

Tabela 14 - Hierarquia de sistemas nível Superior

Nível 0	Nível 1	Nível 2
Ambiente de testes para veículo de levitação Supercondutora	Veículo (1.0.0.0)	Carroceria (1.1.0)
		Sistema de porta (1.2.0)
		Sistema de Controle Veicular (1.3.0)
		Sistema de Monitoramento (1.4.0)
		Sistema de comunicação (1.5.0)
		Sistema de tração/Potência (1.6.0)
		Sistema de freio (1.7.0)
		Sistema de Levitação (1.8.0)
		Sistema de Abastecimento (1.9.0)
		Sistemas Auxiliares (1.10.0)
	Infraestrutura Civil (2.0.0.0)	Superestrutura (2.1.0)
		Instal. Elétricas Estações e Via (2.2.0)
		Instalações hidráulica/esgoto (2.3.0)
		Acesso (2.4.0)
		Trilhos (2.5.0)

Onde as subcategorias do nível (3) ganham classificações de acordo com a tabela 15, abaixo.

Tabela 15 - classificação em grandes áreas

Classificação	Mecânica	Elétrica	Eletrônica	Civil	Software
	M	E	K	C	S

A tabela 30 completa se encontra no apêndice (A), ela compreende todos os sistemas até o 3º nível com a descrição e o número de cada item de acordo com a classificação da tabela 15. Esta organização se torna importante para identificar o tipo de especialista que deve cuidar de cada área e é uma demanda da norma utilizada.

Os itens referentes à infraestrutura civil (2.0.0.0) não serão abordados neste trabalho.

Um dos requisitos do requerimento 2 é a realização de um PHA (análise preliminar de riscos) esta análise deverá ser feita no futuro.

Esta análise elenca quais são os riscos inerentes da atividade como, por exemplo:

- Colisão trem/trem
- Colisão veículo/ fim de linha
- Colisão veículo/ plataforma
- Atropelamento
- Descarrilamento
- Incêndio
- Ferimento
- Queda
- Choque
- Explosão
- Entre outros

Capítulo 6 – Realização da Análise de Criticidade

Para esta análise, todos os itens descritos na tabela 30 (do apêndice A) foram avaliados com relação à severidade, frequência de ocorrência de falhas e probabilidade de detecção de pelo menos dois modos de falha. Desta forma, é possível encontrar os itens mais críticos e avaliar o nível de atenção que cada componente deve ter.

Para este estudo foi utilizada a tabela 16 do Instituto de Qualidade Automotiva para determinar o índice de risco em: Muito Alto, Alto, Médio e Baixo.

Tabela 16 - Índice de risco segundo o Instituto de qualidade automotiva

Componente do NPR	Classificação	Peso
OCORRÊNCIA (O)	Improvável	1
	Muito Pequena	2 a 3
	Pequena	4 a 6
	Média	7 a 8
	Alta	9 a 10
SEVERIDADE (S)	Apenas perceptível	1
	Pouca importância	2 a 3
	Moderadamente grave	4 a 6
	Grave	7 a 8
	Extremamente grave	9 a 10
DETECÇÃO (D)	Alta	1
	Moderadamente grave	2 a 5
	Pequena	6 a 8
	Muito pequena	9
	Improvável	10
ÍNDICE DE RISCO NPR	Baixo	1 a 50
	Médio	50 a 100
	Alto	100 a 200
	Muito alto	200 a 1000

Fonte: Instituto da Qualidade Automotiva (IQA)

É exposta a seguir na tabela 17 o resultado da análise de criticidade onde se obtém na última coluna o NPR resultado da fórmula 4.4.

Tabela 17 - Análise de criticidade de forma Qualitativa

Nível 3	Endereço do item	Modo de Falha	Severidade	Ocorrência	Detecção	Criticidade
Estrutura em fibra do vagão	M1.1.1.0	Distorção	5	2	2	20
		Quebra	8	2	2	32
Janela lateral	M1.1.2.0	Abertura	2	1	1	2
		Quebra	4	1	1	4
Janela frontal	M1.1.3.0	Abertura	6	5	2	60
		Travamento	9	1	7	63
Painel de equipamentos	M1.1.4.0	Solta	3	5	3	45
		Quebra	3	4	3	36
Suporte de equipamentos	M1.1.5.0	Solta	8	3	3	72
		Quebra	8	3	3	72

Conexão entre vagões	M1.1.6.0	Desalinhamento	6	7	4	168
		Quebra	8	1	5	40
Banco	M1.1.7.0	Solta	3	1	3	9
		Desgaste	3	1	1	3
Pega mão	M1.1.8.0	Solta	5	2	2	20
		Quebra	5	2	2	20
Piso	M1.1.9.0	Solto	6	3	2	36
		Degrau	5	5	2	50
Vedação entre vagões	M1.1.10.0	Solta	4	3	2	24
		Rasgada	5	2	2	20
Estrutura de fixação dos Criostatos	M1.1.11.0	Distorção	8	2	7	112
		Quebra	8	1	7	56
Estrutura de fixação das rodas de segurança	M1.1.12.0	Distorção	9	3	7	189
		Quebra	9	2	7	126
Rodas de segurança	M1.1.13.0	Solta	9	2	5	90
		Desgaste	7	5	5	175
Suporte das escovas coletoras de energia	M1.1.14.0	Solta	4	2	2	16
		Desalinhamento	3	4	3	36
Folha de porta	M1.2.1.0	Distorção	5	7	2	70
		Quebra ou solta	9	2	1	18
Motor elétrico dc	E1.2.2.0	Falta de torque	6	4	2	48
		Não gira	6	4	2	48
Eixo árvore	M1.2.3.0	Distorção	6	1	2	12
		Folga	4	4	2	32
Barra estabilizadora	M1.2.4.0	Distorção	4	4	2	32
		Folga	4	4	2	32
Rolamentos de esferas	M1.2.5.0	Folga	3	2	3	18
		Travamento	6	3	3	54
Placa eletrônica de controle	K1.2.6.0	Mal contato	4	3	4	48
		Queima	4	2	4	32
Chave de fim de Curso	E1.2.7.0	Não fecha contato	4	3	3	36
		Curto	4	2	2	16
Fuso trapezoidal	M1.2.8.0	Alto atrito	4	3	2	24
		Desalinhamento	5	2	2	20
Castanha p/ fuso trapezoidal	M1.2.9.0	Alto atrito	4	2	2	16
		Travamento	5	2	2	20
Guia linear	M1.2.10.0	Alto atrito	4	2	2	16
		Desalinhamento	4	2	2	16
Espaçador	M1.2.11.0	Distorção	3	2	2	12
		Desalinhamento	3	2	2	12
Botão de acionamento	E.1.2.12.0	Curto	6	2	3	36
		Não faz contato	6	2	3	36
Alavanca de comando	K1.3.1.0	Curto	8	3	6	144
		Não faz contato	8	3	3	72

Controlador logico programável TPW	K1.3.2.0	Não responde	7	3	3	63
		Queima a porta	7	3	3	63
IHM- Interface homem maquina	K1.3.3.0	Não liga	4	2	2	16
		Não responde ao toque	5	3	3	45
Programação <i>Ladder</i>	S1.3.4.0	Erro Programação	8	3	4	96
		Erro de parâmetros	7	3	4	84
Sensor de altura	K1.4.1.0	Mal contato	3	2	4	24
		Erro	3	1	1	3
Sensor de velocidade	K1.4.2.0	Mal contato	5	4	3	60
		Não mede	5	4	3	60
GPS	K1.4.3.0	Atraso na resposta	4	3	3	36
		Erro de posição	4	3	2	24
Câmera veicular	K1.4.4.0	Mal contato	2	4	1	8
		Não mostra o q se propõe	2	1	1	2
Acelerômetro	K1.4.5.0	Mal contato	2	2	1	4
		Erro de sinal	2	2	1	4
Amperímetro	K1.4.6.0	Mal contato	2	2	2	8
						0
Voltímetro	K1.4.7.0	Mal contato	3	2	2	12
						0
Medidor de freq. Do inversor	K1.4.8.0	Mal contato				0
						0
Equipamento de aquisição de dados	K1.4.9.0	Mal contato	8	2	3	48
		Erro de comunicação	8	2	4	64
Software de Proc. Dados	S1.4.10.0	Erro na entrada de dados	8	3	2	48
		Erro de process/Prog	8	3	2	48
HD	K1.4.11.0	Cheio	3	1	1	3
		Travado	3	1	3	9
Gateway	K1.5.1.0	Erro de comunicação	3	2	2	12
		Falta de rede	3	2	2	12
Cabo de rede	E1.5.2.0	Quebrado	4	1	5	20
		Mal contato	4	2	3	24
Caixa de proteção	M1.5.3.0	Entra água	4	2	4	32
		Aquece	4	4	2	32
PLC	K1.5.4.0	Mal contato	3	3	5	45
		Muito ruído na linha	3	7	3	63
Antenas	K1.5.5.0	Falta de alcance	3	1	1	3
		Quebra	3	3	5	45

Quadro de Força	E1.6.1.0	Curto	8	3	3	72
		Aterramento	8	3	1	24
Autotransformador	E1.6.2.0	Curto	8	3	1	24
		Aterramento	8	2	2	32
Conversor Regenerativo	E1.6.3.0	Falha de inversor	3	3	1	9
		curto	5	2	3	30
Chave seccionadora	E1.6.4.0	Aberta	4	3	2	24
		fechada	4	3	2	24
Barramento DC	E1.6.5.0	Mal contato	6	2	5	60
		fixação	4	2	4	32
Coletores	E1.6.6.0	desgaste	6	3	3	54
		Mal contato	6	2	5	60
Primário do motor linear	E1.6.7.0	curto	6	2	4	48
		condições fora de especificação				0
Secundário do motor Linear	E1.6.8.0	Fixação	3	2	2	12
		Distorção	4	4	2	32
Inversor de frequência	E1.6.9.0	Queima de resistor	6	3	2	36
		Não responde	6	6	2	72
Disjuntor	E1.6.10.0	Aberto	5	2	1	10
		Sobre dimensionado	6	2	4	48
Bomba hidráulica	E1.7.1.0	Falta de força	6	1	3	18
		Não liga	7	1	1	7
Tanque de óleo	M1.7.2.0	Vazamento	3	3	3	27
		Nível baixo	1	2	1	2
Acumulador	M1.7.3.0	Vazamento	7	2	3	42
						0
Mangotes flexíveis	M1.7.4.0	Vazamento	6	3	3	54
		Dobra	3	2	3	18
Terminal de mangote	M1.7.5.0	Vazamento	6	3	3	54
						0
Manômetro	M1.7.6.0	Fora de escala	4	2	1	8
		Erro de especificação	4	1	1	4
Pistão esquerdo	M1.7.7.0	Vazamento	6	3	3	54
		Fixação	6	2	3	36
Pistão direito	M1.7.8.0	Vazamento	6	3	3	54
		Fixação	6	2	3	36
Sapata de freio	M1.7.9.0	fixação	6	3	3	54
		Desgaste	5	3	2	30
Pista de Frenagem	M1.7.10.0	Baixo Atrito	7	2	1	14
		Distorção	6	6	1	36
Botão de acionamento no painel	K1.7.11.0	Mal contato	6	3	2	36
		Não responde	7	2	1	14

Pressostato do acumulador	K1.7.12.0	Erro de sinal	6	2	2	24
		Não envia sinal	7	3	1	21
Criostato	M1.8.1.0	Perda de vácuo	8	8	4	256
		Perda de levitação	10	7	5	350
trilho	M1.8.2.0	Objeto no trilho	9	3	2	54
		Desalinhamento	4	3	2	24
Guia de abastecimento	M1.8.3.0	Desalinhamento	4	4	3	48
		Obstrução	6	2	2	24
fixação do criostato	M1.8.4.0	Distorção	4	2	2	16
		Quebra	9	3	5	135
Tanque TM500	M1.9.1.0	Alta pressão	5	2	1	10
		Vazio	10	1	1	10
Gradil de isolamento	M1.9.2.0	Não abre	1	2	1	2
		Não fecha	4	1	1	4
Tubulação isolada	M1.9.3.0	Perda de vácuo	5	2	1	10
						0
Manifold	M1.9.4.0	Alta pressão	6	4	2	48
						0
Mangueiras flexíveis s/ vácuo	M1.9.5.0	Isolamento rompido	8	3	2	48
		Suja	4	2	5	40
Linha de abastecimento móvel	M1.9.6.0	Não se move facilmente	4	2	1	8
						0
Botoneiras de acionamento	E1.9.7.0	Mal contato	5	3	2	30
		Não aciona	7	2	2	28
Bomba de Vácuo <i>Hi Cube</i> 80 (pequena)	M1.9.8.0	Não atinge o vácuo	3	4	3	36
		Não bombeia	2	2	2	8
<i>Fittings</i> de vácuo	M1.9.9.0	Quebra	7	6	2	84
		Sujeira	4	5	3	60
Bateria 12V	E1.10.1.0	Não carrega	7	3	2	42
		Descarrega rápido	7	5	2	70
Led Iluminação interna	K1.10.2.0	Queima	2	3	1	6
						0
Tomada tipo isqueiro	E1.10.3.0	Não fornece tensão	2	3	2	12
						0
Disjuntores de sistema auxiliar	E1.10.4.0	Aberto	4	3	3	36
		Sobre dimensionado	6	3	4	72
Barramento de cobre	E1.10.5.0	curto	4	2	2	16
		exposto	8	2	2	32
Display de nível de bateria	K1.10.6.0	Mal contato	3	3	2	18
		Apagado	3	3	2	18
Controle de porta de	K1.10.7.0	sem bateria	6	2	2	24

estação		não responde	6	2	2	24
Lâmpada de indicação de sentido	K1.10.8.0	Mal contato	8	3	3	72
		queimada	8	3	3	72

6.1 Resultado

Como resultado desta análise os seguintes dados foram extraídos:

Tabela 18 - Resultado da Análise

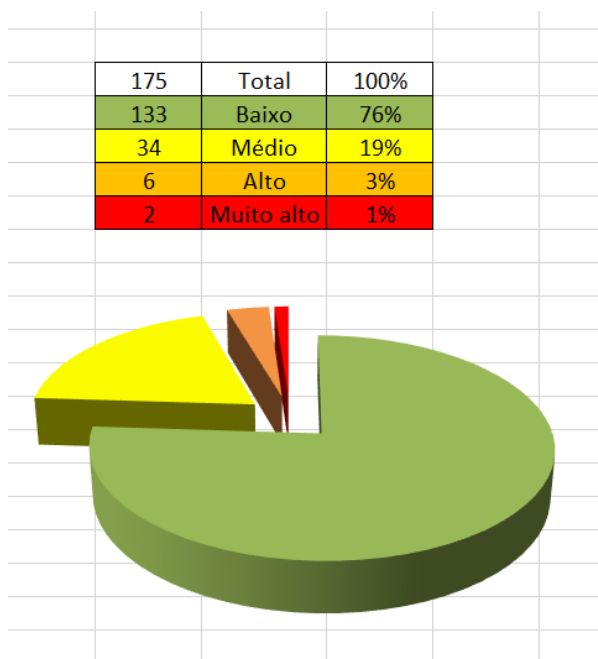


Figura 18 - Gráfico de pizza ilustrando os modos de falha avaliados

Um total de 175 modos de falha foram avaliados de acordo com os critérios estabelecidos. Desses, 133 apresentaram risco baixo de acordo com o índice NPR; 34 risco médio; 6 apresentaram risco alto e 2 itens apresentaram risco muito alto.

Como era de se esperar o criostato é o item mais crítico com um IC ou NPR de 256 para perda de vácuo e 350 para perda de levitação, o que levaria o veículo ao solo.

A partir desta informação, o criostato se torna objeto de análise deste trabalho de mestrado que deverá incluir uma análise mecânica deste componente de extrema importância à segurança da operação do veículo no transporte de passageiros.

Capítulo 7 – Metodologia do estudo do Criostato

O objetivo deste estudo é analisar a confiabilidade dos criostatos, com a finalidade de reduzir os riscos envolvidos na operação do veículo de levitação. Para a realização desta análise é importante conhecer como o criostato funciona, como ele é construído e qual é o comportamento esperado do mesmo. Desta forma, o método do estudo será o seguinte:

- Exposição:
 - Especificar as condições de funcionamento e solicitações mecânicas (proposta de serviço);
 - Especificar princípio de funcionamento
 - Especificar como o criostato é construído;
- Análise:
 - Tipo de falhas e efeito das falhas;
 - Como é a manutenção;
 - Como é a operação;
 - Ponto de operação ótimo;
 - Estimativas de consumo de Ln_2 e custos
- Proposta:
 - Correções e modificações de projeto
- Conclusões

Utilizando a metodologia acima, as características mecânicas foram levantadas e melhorias foram sugeridas para atender as normas de segurança expostas neste trabalho e para baixar o índice NPR.

Entende-se que a norma escolhida é extensa e que demandaria o trabalho de toda uma equipe multidisciplinar para realizar uma avaliação total.

Pela questão do tempo de finito para elaboração deste trabalho, a análise mecânica se restringirá ao levitador (criostato) que é o item mais importante e característico da tecnologia de Levitação Supercondutora.

7.1 - Exposição

7.1.1 Proposta de serviço

O criostato foi projetado para suportar uma carga axial de aproximadamente 2500 N a 10 mm de distância do trilho durante 24 horas ininterruptas de funcionamento. Deve suportar também cargas laterais na mesma intensidade. Para seu funcionamento, as cerâmicas devem ser refrigeradas abaixo de 92K. Para atingir esta temperatura, comumente utiliza-se um banho de LN₂. A forma utilizada no criostato é semelhante, porém, os blocos supercondutores não estão localizados dentro da câmara, mas colados da parede inferior externa realizando troca térmica com esta parede. Este detalhe pode ser visto nas figuras 23 e 26.

Como o exposto, para a levitação do veículo é necessário refrigerar as cerâmicas no interior do criostato com nitrogênio líquido antes do início da operação. Este procedimento é chamado de abastecimento criogênico e pode ser realizado de duas formas diferentes segundo [28].

- Abastecimento manual com um funil que demora em torno de 90 minutos e não utiliza pressão (método utilizado pelos concorrentes chineses e alemães).
- Abastecimento pressurizado a 2 bar, se feito individualmente demora 10 minutos por criostato ou, no caso do veículo, todos os 24 criostatos juntos demorando 40 minutos no total.

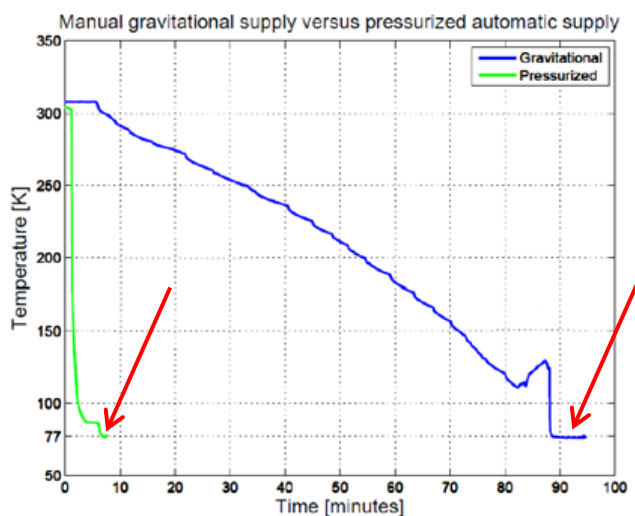


Figura 19 - Tempo de abastecimento individual

O longo tempo de abastecimento acontece por causa da troca térmica entre o fluido que está entrando na câmara e a própria câmara. Assim, só há acúmulo de LN2 quando a câmara entra em equilíbrio térmico com o nitrogênio líquido.

Outros requisitos de operação são: suportar variações de carga ao longo do dia com a entrada e saída de passageiros; esforços dinâmicos de aceleração e frenagem e, diferenças de clima em ambiente externo. Além disso, sua estrutura deve ser forte o suficiente para aguentar impactos com possíveis obstáculos no trilho e ainda deve ser capaz de manter o isolamento térmico para preservar o nitrogênio líquido no seu interior.

Este equipamento é instalado no veículo através de fixação mecânica por parafusos em sua parte superior sendo possível sua retirada para reparos. A seguir a figura 20 ilustra a integração do criostato ao sistema do veículo [29].

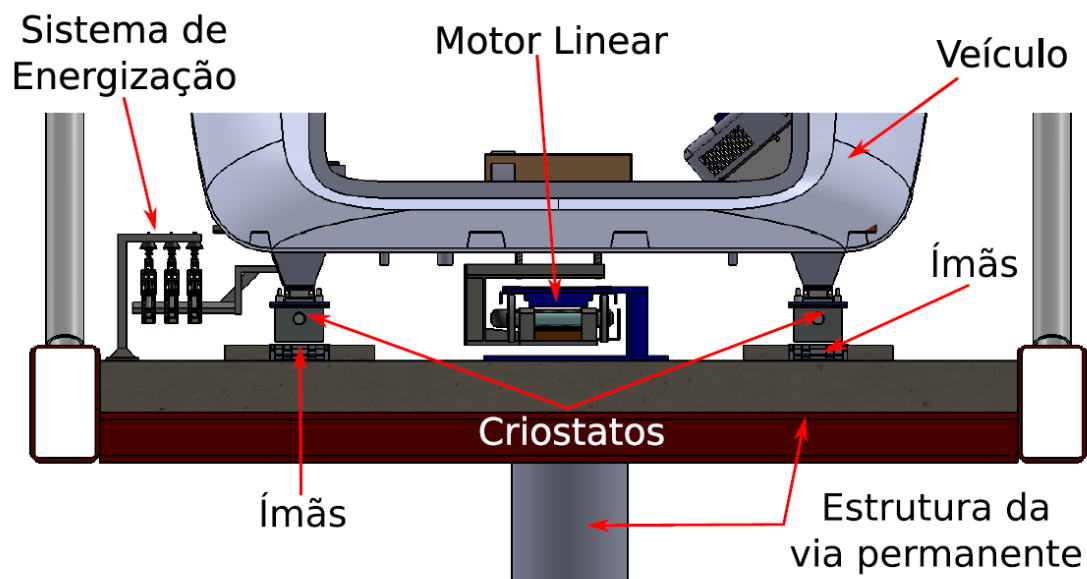


Figura 20 - Ilustração do Sistema Maglev Cobra de transporte

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0123>

7.1.2 Princípios de Funcionamento do Criostato

Até hoje não existe uma teoria que explique completamente o fenômeno da supercondutividade e o comportamento dos supercondutores. Porém, existem algumas teorias que tentam abordar alguns aspectos que envolvem o fenômeno. Uma das mais famosas foi publicada em 1957 por Bardeen, Cooper e Schrieffer a chamada de teoria BCS. Outras teorias foram desenvolvidas ao longo da história, como a de London (1935), Ginzburg e Landau (1950), Cooper (1956).

A principal característica de um supercondutor é apresentar resistividade nula a passagem de corrente elétrica quando se encontra abaixo da sua temperatura crítica. A levitação de um supercondutor em cima de um campo magnético é um outro fenômeno observado neste tipo de material.

O fundamento que explica parte da levitação supercondutora é o comportamento diamagnético que exclui o campo no interior do supercondutor, fenômeno que acontece nos supercondutores do tipo I ilustrada a seguir.

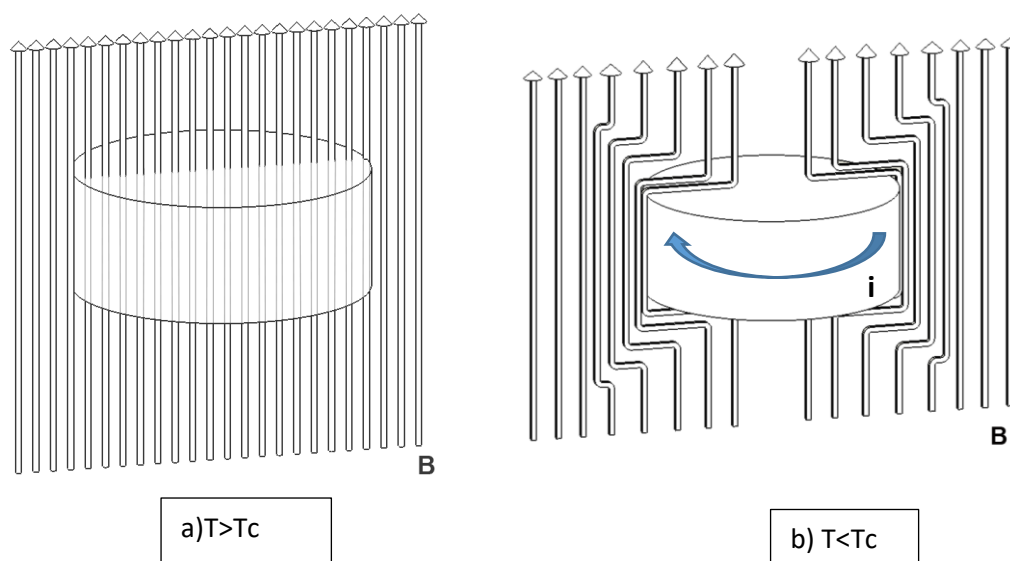


Figura 21 - a) Antes da transição Supercondutora penetração de campo, b) Depois da transição supercondutora exclusão de campo.

É possível observar que antes da transição supercondutora todo campo externo atravessa o material como se a cerâmica fosse “transparente”, porém quando a transição acontece o material vira um diamagneto perfeito e exclui todo o campo externo do seu interior.

Esta reação gera correntes elétricas dentro do material que por sua vez geram um campo que anula o campo externo. Como se fosse um mecanismo de defesa.

O comportamento dos supercondutores do tipo II é diferente, neles é possível aprisionar fluxo magnético no seu interior através dos Fluxóides. Estas estruturas são regiões normais (não supercondutoras) que aparecem no estado misto entre os valores de campo H_{c1} e H_{c2} .

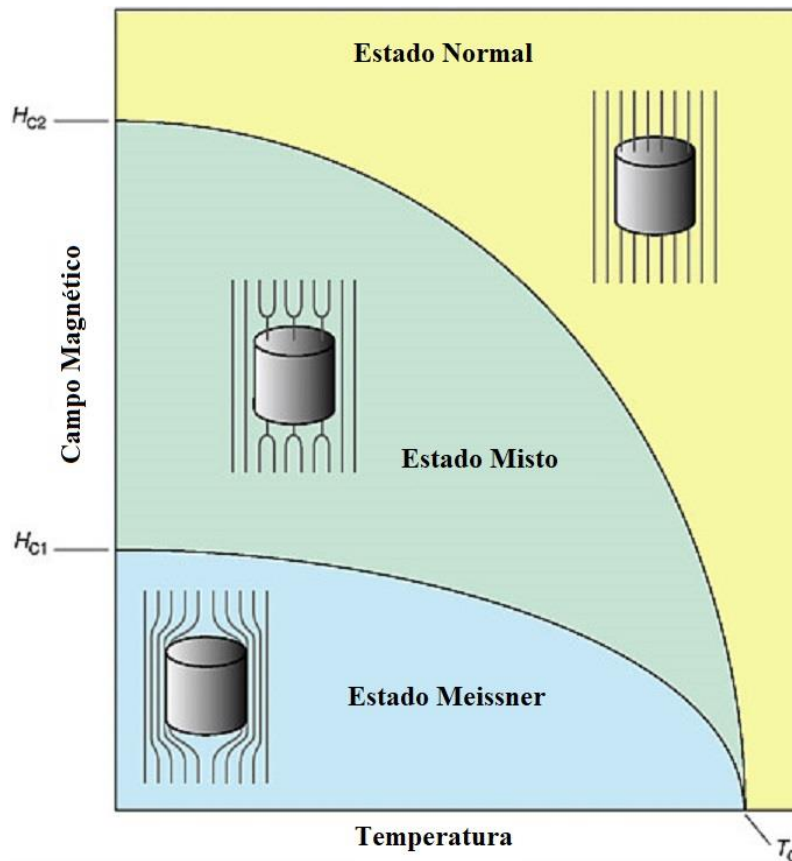
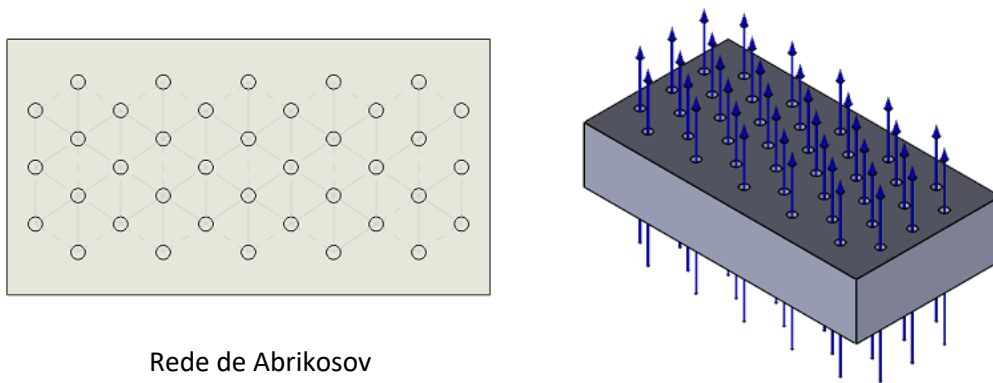


Figura 22 - Supercondutores do tipo II

Os Fluxóides concentram parte do fluxo magnético através do surgimento de redes de organização hexagonal chamadas de Rede de Abrikosov. Esta estrutura está ilustrada na figura 23.



Rede de Abrikosov

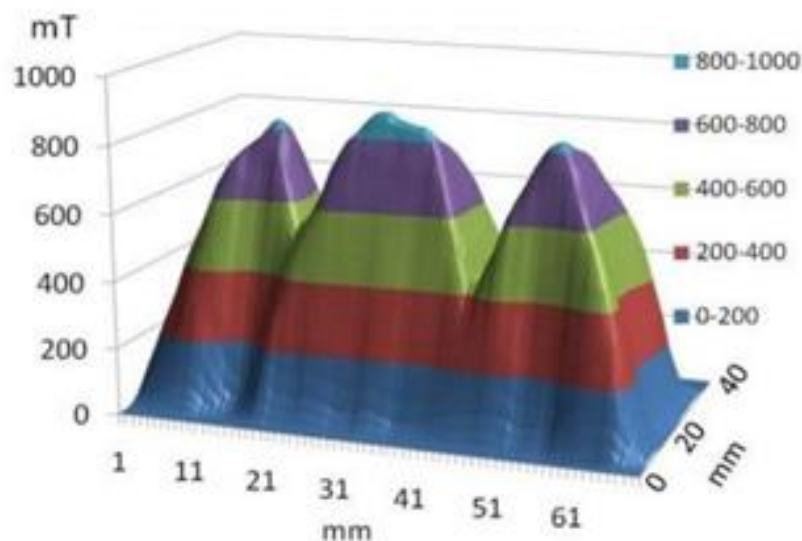


Figura 23 - Fluxóides permitindo a passagem do campo magnético externo ao supercondutor e medição do fluxo de campo magnético aprisionado no interior de um Supercondutor tipo II abaixo da TC.

É através deste mecanismo que as cerâmicas no interior do criostato funcionam, aprisionando o campo magnético fornecido pelo trilho de ímãs, e apresentando assim características atrativas e repulsivas, permitindo desta forma, suportar cargas de forma estável, o que seria impossível de outra forma passiva, sem controle.

Outra característica é que o supercondutor “memoriza” o perfil de campo aprisionado como um campo de equilíbrio. Toda mudança no perfil de campo é uma perturbação da condição de equilíbrio e portanto há uma reação no sentido de restaurar a condição inicial.

O trilho magnético oferece um perfil de campo magnético constante apenas na direção longitudinal (eixo X), ou seja, na direção de movimentação do veículo de forma que os supercondutores não percebem que estão se movimentando. Nas outras direções (eixo Y

e Z) o perfil de campo muda e portanto qualquer movimentação na direção desses eixos causa uma reação na forma de força restauradora. São essas forças que mantêm o veículo nos trilhos e impedem um descarrilamento.

A operação do veículo deve respeitar os limites de carga admissíveis pelos criostatos e estes limites de força estão relacionados com as condições iniciais da transição supercondutora num processo chamado de “*Field Cooling*” ou apenas FC.

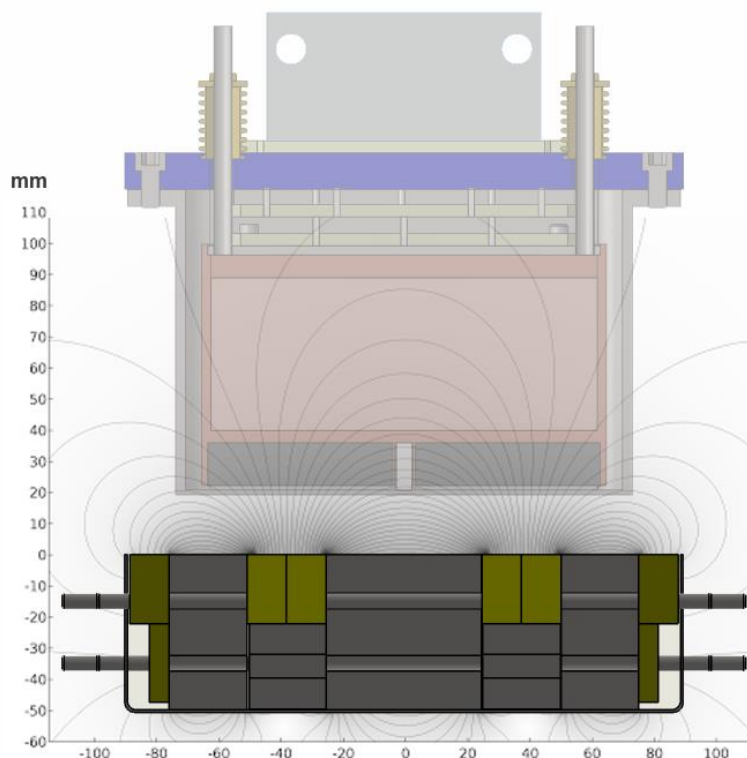


Figura 24 - Campo magnético que penetra no supercondutor

O FC acontece no momento em que a a cerâmica atinge a temperatura crítica e realiza a transição supercondutora na presença de campo magnético. Dependendo da distância entre o criostato e o trilho, o perfil de campo magnético que penetra no supercondutor é diferente e influencia na formação das redes de fluxóides o que modifica as características de força suportada deste momento em diante. Portanto, abastecimentos realizados em alturas diferentes geram forças de levitação diferentes também. O quanto mais afastado do trilho, maior é a força de levitação e menor é a estabilidade lateral. Quanto mais perto do trilho, menor é a força de levitação e maior é a estabilidade lateral.

7.1.3 Modelagem Dinâmica

É possível então modelar o comportamento do conjunto de levitação como sendo um sistema mola-amortecedor onde o K (rigidez elástica) e o C (constante de amortecimento) são dependentes das condições iniciais de FC. A figura a seguir ilustra um modelo simplificado do veículo.

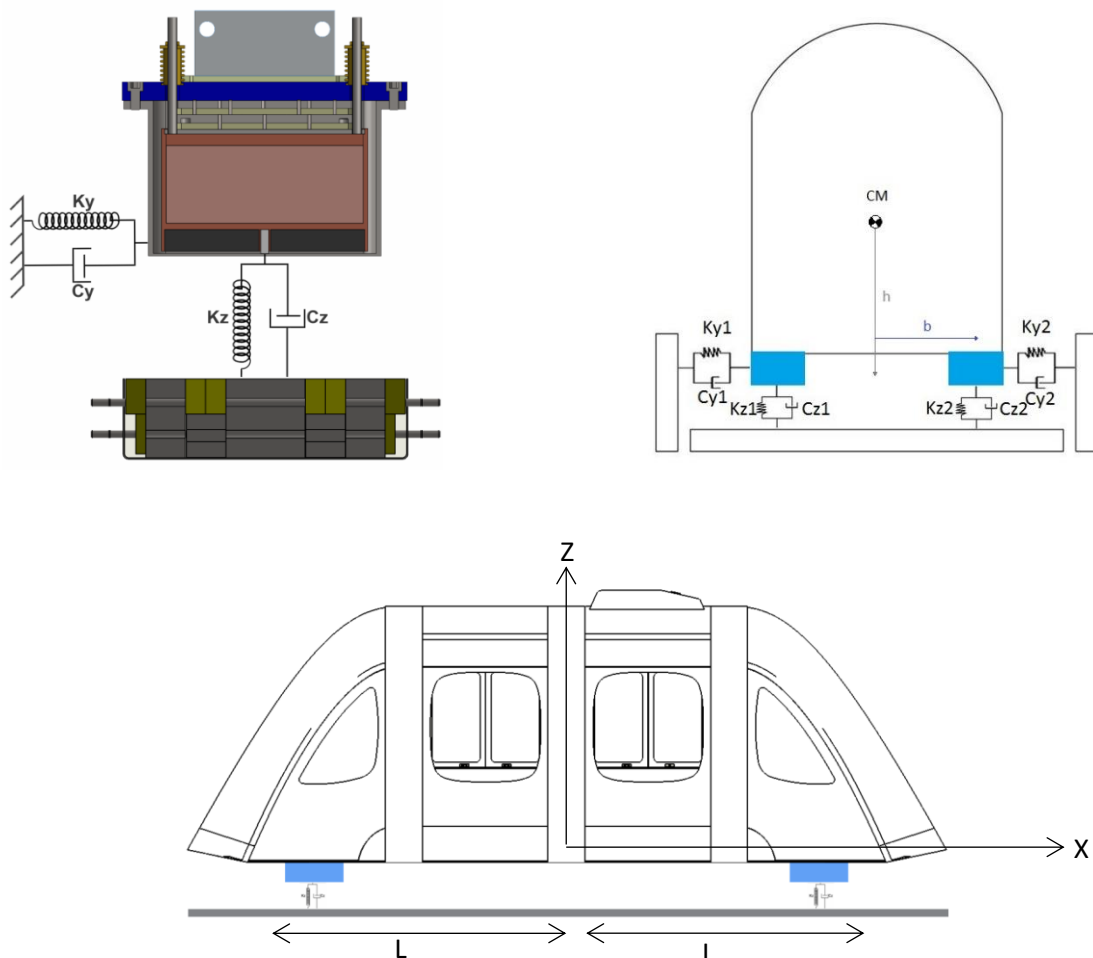
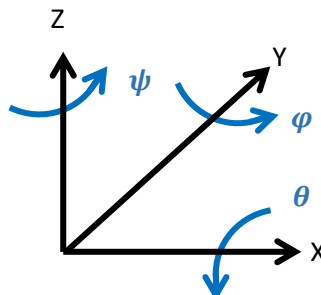


Figura 25 - Esquemático para modelagem dinâmica



Através destes fatores de K e C é possível escrever as equações dinâmicas para o veículo.

Somatório de forças na direção Z: (7.1)

$$M\ddot{Z} + C_{z1}\dot{Z} + C_{z2}\dot{Z} + K_{z1}Z + K_{z2}Z = Mg$$

Somatório de momentos na direção Z (Guinada ou Yaw): (7.2)

$$J_z\ddot{\psi} + C_{y1}L(\dot{Y} - h\dot{\theta} + L\dot{\psi}) - C_{y2}L(\dot{Y} - h\dot{\theta} + L\dot{\psi}) + K_{y1}L(Y - h\theta + L\psi) - K_{y2}L(Y - h\theta + L\psi) = Mz$$

Somatório de forças na direção Y: (7.3)

$$M\ddot{Y} + C_{y1}(\dot{Y} - h\dot{\theta} + L\dot{\psi}) + C_{y2}(\dot{Y} - h\dot{\theta} - L\dot{\psi}) + K_{y1}(Y - h\theta + L\psi) + K_{y2}(Y - h\theta - L\psi) = 0$$

Somatório de momentos na direção Y (Arfagem ou Pitch): (7.4)

$$J_y\ddot{\phi} + C_{z1}L^2\dot{\phi} + C_{z2}L^2\dot{\phi} + K_{z1}L^2\phi + K_{z2}L^2\phi = M_y$$

Somatório de forças na direção X: (7.5)

$$M\ddot{X} = 0$$

Somatório de momentos na direção X (Rolagem ou Roll): (7.7)

$$J_x\ddot{\theta} - C_{y1}h(\dot{Y} - h\dot{\theta} + L\dot{\psi}) - C_{y2}h(\dot{Y} - h\dot{\theta} - L\dot{\psi}) - K_{y1}h(Y - h\theta + L\psi) - K_{y2}h(Y - h\theta - L\psi) + (C_{z3} + C_{z4})b^2\dot{\theta} + (K_{z3} + K_{z4})b^2\theta - Mgh\theta = Mx$$

O estudo da dinâmica do Maglev não é o foco deste trabalho, mas sim a definição dos parâmetros de força que são modificados com a variação das condições de *Field cooling* e que garantam as melhores condições de força vertical e lateral para as solicitações durante o período de operação.

Para isso serão realizados diversos testes em uma máquina que simula o carregamento do trem exercendo força vertical em cima do criostato.

7.1.4 Modelagem Termodinâmica (cálculo da entrada de calor)

O Criostato foi projetado para funcionar durante pelo menos 24 horas e para isso ele deve manter o nitrogênio no estado líquido em seu interior. Portanto, o isolamento térmico deve estar intacto.

O criostato possui 2 tipos de isolamento, o isolamento à vácuo onde é feita uma pressão de 5×10^{-5} mbar e, os escudos de radiação (Mylar). O vácuo reduz as transferências de calor na forma de convecção e condução que necessitam de um meio para se propagar e o *Mylar* protege contra entrada de calor na forma de radiação.

Em perfeitas condições a entrada líquida de calor no criostato é de 3 a 4 Watts conforme os cálculos a seguir:

Tabela 19 - Propriedades termodinâmicas do nitrogênio

Tabela B.6 – Propriedades termodinâmicas do nitrogênio

Tabela B.6.1

Nitrogênio saturado

Temp. K	Pressão kPa	Volume específico (m ³ /kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado v_l	Evap. v_{lv}	Vapor saturado v_v	Líquido saturado u_l	Evap. u_{lv}	Vapor saturado u_v	Líquido saturado h_l	Evap. h_{lv}	Vapor saturado h_v	Líquido saturado s_l	Evap. s_{lv}	Vapor saturado s_v
63,1	12,5	0,001150	1,48074	1,48189	-150,92	196,86	45,94	-150,91	215,39	64,48	2,4234	3,4109	5,8343
65	17,4	0,001160	1,09231	1,09347	-147,19	194,37	47,17	-147,17	213,38	66,21	2,4816	3,2828	5,7645
70	38,6	0,001191	0,52513	0,52632	-137,13	187,54	50,40	-137,09	207,79	70,70	2,6307	2,9684	5,5991
75	76,1	0,001223	0,28052	0,28174	-127,04	180,47	53,43	-126,95	201,82	74,87	2,7700	2,6909	5,4609
77,3	101,3	0,001240	0,21515	0,21639	-122,27	177,04	54,76	-122,15	198,84	76,69	2,8326	2,5707	5,4033
80	137,0	0,001259	0,16249	0,16375	-116,86	173,06	56,20	-116,69	195,32	78,63	2,9014	2,4415	5,3429
85	229,1	0,001299	0,10018	0,10148	-106,55	165,20	58,65	-106,25	188,15	81,90	3,0266	2,2135	5,2401
90	360,8	0,001343	0,06477	0,06611	-96,06	156,76	60,70	-95,58	180,13	84,55	3,1466	2,0015	5,1480
95	541,1	0,001393	0,04337	0,04476	-85,35	147,60	62,25	-84,59	171,07	86,47	3,2627	1,8007	5,0634
100	779,2	0,001452	0,02975	0,03120	-74,33	137,50	63,17	-73,20	160,68	87,48	3,3761	1,6068	4,9829
105	1084,6	0,001522	0,02066	0,02218	-62,89	126,18	63,29	-61,24	148,59	87,35	3,4883	1,4151	4,9034

Volume da câmara: 0,00285 [m³]

Entalpia do líquido saturado: -122,15 [kJ/kg]

Volume específico LN₂: 0,00124 [m³/kg]

Tempo: 24 horas

$$Q = \frac{Vol}{Vol_{esp}} \times Entalpia = \frac{0,00285 [m^3]}{0,00124 [\frac{m^3}{kg}]} \times (-122,15 [kJ/kg]) = 280,75 [kJ]$$

$$\dot{Q} = \frac{Q}{Tempo} = \frac{280,75 [J] \times 1000}{86400 [s]} = \mathbf{3,25 \text{ W}} \quad (7.8)$$

Quando o isolamento é comprometido, a troca de calor é maior e causa a evaporação mais rápida do nitrogênio líquido.

Considerando que os escudos de radiação não foram comprometidos devido ao fato de estarem protegidos no interior da câmara de vácuo, será analisado o isolamento a vácuo.

Convecção molecular (gasosa)

O principal meio de troca de calor no vácuo é a radiação, porém também acontecem trocas de energia entre moléculas próximas, uma vez que a câmara de vácuo nunca está totalmente vazia.

As moléculas com mais energia viajam dentro da câmara e colidem com a superfície quente ganhando energia e então colidem com a parede fria e com outras moléculas trocando assim calor.



Figura 26 - Esquema de convecção molecular

Para minimizar a convecção gasosa, a distância entre moléculas (λ chamado de *mean free path*) deve ser maior que a distância entre paredes. Onde $d = 5 \text{ mm}$ no criostato.

$$\lambda \gg d$$

Para isso, faz-se necessário analisar a pressão de vácuo.

Tabela 20 - Propriedades do vácuo

Vácuo	Pressão em hPa (mbar)	Moléculas / m ³	<i>Mean free path</i> (caminho livre entre moléculas)
Pressão ambiente	1013	$2,7 \times 10^{25}$	68 nm
Vácuo baixo	300 – 1	$10^{25} - 10^{22}$	0,1 – 100 μ m
Vácuo médio	$1 - 10^{-3}$	$10^{22} - 10^{19}$	0,1 – 100 mm
Alto vácuo	$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{19} - 10^{15}$	10 cm – 1 km
Ultra- alto vácuo	$10^{-7} - 10^{-12}$	$10^{15} - 10^{10}$	1 km – 10^5 km
Vácuo extremamente alto	$<10^{-12}$	$<10^{10}$	$>10^5$ km

https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_free_path

A partir da tabela de pressão de vácuo, é possível concluir que na faixa de alto vácuo (10^{-3} a 10^{-7} mbar) as distâncias entre moléculas variam em média de 10 cm a 1 km, e que a pressão ideal de isolamento ocorre a partir de 10^{-4} onde λ deve possuir valor da ordem de metros. De fato, isso ocorre na prática, de forma que quanto melhor o vácuo existirá menos moléculas no interior da câmara e assim a distância entre elas será cada vez maior.

Para calcular a entrada de calor em um sistema isolado por vácuo temos o seguinte desenvolvimento.

Definimos o fator de acomodação térmica.

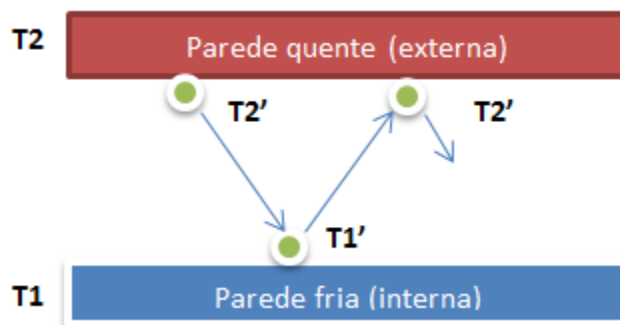


Figura 27 - Temperaturas de acomodação

Para a parede fria, a molécula chega com temperatura T_2' e sai com temperatura T_1' , dessa forma, a diferença de calor é $(T_2' - T_1')$. E a máxima troca térmica seria $(T_2' - T_1)$.

Assim, fica definido: (7.9)

$$a_1 = \frac{T_2' - T_1'}{T_2' - T_1}$$

Para a parede quente, a molécula chega com temperatura T_1' e sai com temperatura T_2' , dessa forma, a diferença de calor é $(T_2' - T_1')$. E a máxima troca térmica seria $(T_2 - T_1')$.

Assim, fica definido: (7.10)

$$a_2 = \frac{T_2' - T_1'}{T_2 - T_1'}$$

Isolando as temperaturas, temos:

$$T_1 = T_2' - \frac{T_2' - T_1'}{a_1}$$

$$T_2 = \frac{T_2' - T_1'}{a_2} + T_1'$$

Logo, (7.11)

$$T_2 - T_1 = (T_2' - T_1') \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} - 1 \right)$$

Dessa forma, fica definido o fator de acomodação F_a : (7.12)

$$\frac{1}{F_a} = \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} - 1 \right)$$

ou

$$F_a = \frac{T_2' - T_1'}{T_2 - T_1}$$

Onde os valores de F_a para diferentes gases residuais são encontrados na tabela 21 e os dados utilizado para o criostato é o do Ar a 78 K.

Tabela 21 - Valores do fator Fa

Temperatura [K]	He	H2	Ne	Ar
300	0,29	0,29	0,66	0,8-0,9
78	0,42	0,53	0,83	1,0
20	0,59	0,97	1,0	1,0

Da teoria cinética dos gases, temos:

$$e = U + KE \quad (7.13)$$

$$e = \left(C_v + \frac{R}{2} \right) T \quad (7.14)$$

$$\Delta e = \left(C_v + \frac{R}{2} \right) \Delta T \quad (7.15)$$

Onde:

R- Constante universal dos gases;

$$C_v = \frac{R}{\gamma - 1}$$

$$\Delta T = (T_2' - T_1')$$

Substituindo:

$$\Delta e = \left(\frac{R}{\gamma - 1} + \frac{R}{2} \right) (T_2 - T_1) F_a$$

$$\Delta e = \frac{F_a R}{2} (T_2 - T_1) \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right)$$

Além disso, o fluxo de massa por área é dado por: (7.16)

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{\rho \bar{v}}{4}$$

Onde a velocidade média é dada por: (7.17)

$$\bar{v} = \left(\frac{8RT}{\pi} \right)^{0.5}$$

$$e \quad (7.18)$$

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{1}{4} \left(\frac{P}{RT} \right) \left(\frac{8RT}{\pi} \right)^{0.5} \quad ou \quad \frac{\dot{m}}{A} = P \left(\frac{1}{2\pi RT} \right)^{0.5}$$

$$e \quad (7.19)$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\dot{m}}{A} (\Delta e)$$

Temos:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = P \left(\frac{1}{2\pi RT} \right)^{0.5} \left(\frac{F_a R}{2} (T_2 - T_1) \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \right)$$

$$\text{Rearranjando:} \quad (7.20)$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \left[\left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \left(\frac{R}{8\pi T} \right)^{0.5} F_a \right] P (T_2 - T_1)$$

Onde T é a temperatura no ambiente de medição da pressão.

$$\text{Esta fórmula é válida para quando } d < \lambda = \frac{\mu}{P} \left(\frac{\pi RT}{2} \right)^{0.5} \quad (7.21)$$

$$\text{Para o cálculo da entrada de calor via radiação temos:} \quad (7.22)$$

$$Q = F_e \sigma A (T_2^4 - T_1^4)$$

$$\text{E para N escudos de radiação o Fator de emissividade vira:} \quad (7.23)$$

$$\frac{1}{F_N} = \left(\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_s} - 1 \right) + (N - 1) \left(\frac{2}{e_s} - 1 \right) + \left(\frac{1}{e_2} + \frac{1}{e_s} - 1 \right)$$

Onde e_1, e_2 , são as emissividades das paredes 1 e 2 e e_s é a emissividade do *shield*.

É possível então calcular a entrada real de calor no criostato. Sendo:

Tabela 22 - Tabela dos dados utilizados para o cálculo da entrada de calor no criostato

Δt	220	K
T1	78	K
T2	298	K
A1	0,193864	m ²
A2	0,2344	m ²
d	0,005	m
R	287	J/g K
Pi	3,14	
μ	0,00001847	
Pmilibar	5,00E-04	milibar
γ	1,4	
Tmedio	188	K
Rgases	8,314	J molK-1
e1 (cobre)	0,6	
e2 (inox)	0,18	
Am	0,213490997	m ²
es (Mylar)	0,044	
N	3	escudos

Onde, pela fórmula anterior

$$F_n = 0,00716405$$

Logo,

$$Q_{\text{radiação}} = 0,00716405 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 0,21349(298^4 - 78^4) = \mathbf{0,68 \text{ W}}$$

Tabela 23 - Entrada de calor total com dependência da pressão de vácuo

Espessura de camada de vácuo 5mm		Pressão [mbar]	λ [m]	Kn	Regime de transf. Calor	Calor de condução [W]	Total (Condução+ Radiação) [W]
	P1	5,00E-01	0,0001	2,707E-02	Regime de transição	Não válida	
	P2	5,00E-02	0,0014	2,707E-01	<i>free molecular regime</i>	3,47E+02	347,975
	P3	5,00E-03	0,0135	2,707E+00	<i>free molecular regime</i>	3,47E+01	35,354
	P4	5,00E-04	0,135	2,707E+01	<i>free molecular regime</i>	3,47E+00	4,092
	P5	5,00E-05	1,353	2,707E+02	<i>free molecular regime</i>	3,47E-01	0,965
	P6	5,00E-06	13,536	2,707E+03	<i>free molecular regime</i>	3,47E-02	0,653
	P7	5,00E-07	135,36 1	2,707E+04	<i>free molecular regime</i>	3,47E-03	0,622
	1 atm	1013,25	4,587E-08	9,174E-06	Regime contínuo	Não válida	

Através deste cálculo é possível observar que a pressão no interior do criostato deve ser pelo menos igual a P4 para se ter um resultado compatível com o cálculo de evaporação de nitrogênio total realizado anteriormente.

Embora durante o processo de evacuação do criostato a pressão alcançada seja menor que 5×10^{-5} mbar, algum fenômeno ocorre e degrada a pressão de vácuo. Este fenômeno pode ser de natureza química quando a pressão de vapor parcial de algum elemento seja próxima à da câmara fazendo com que este material sublime no vácuo, ou alguma permeabilidade gasosa da própria câmara que permite que moléculas exteriores penetrem no espaço evacuado.

A câmara é fabricada em inox 304, liga austenítica não ferromagnética, e possui a função de suportar a diferença de pressão de vácuo no interior (1×10^{-5} mbar) e 1 atm no meio externo e sem ser atraída pelo trilho de ímãs.

7.1.5 Aspectos construtivos do Criostato

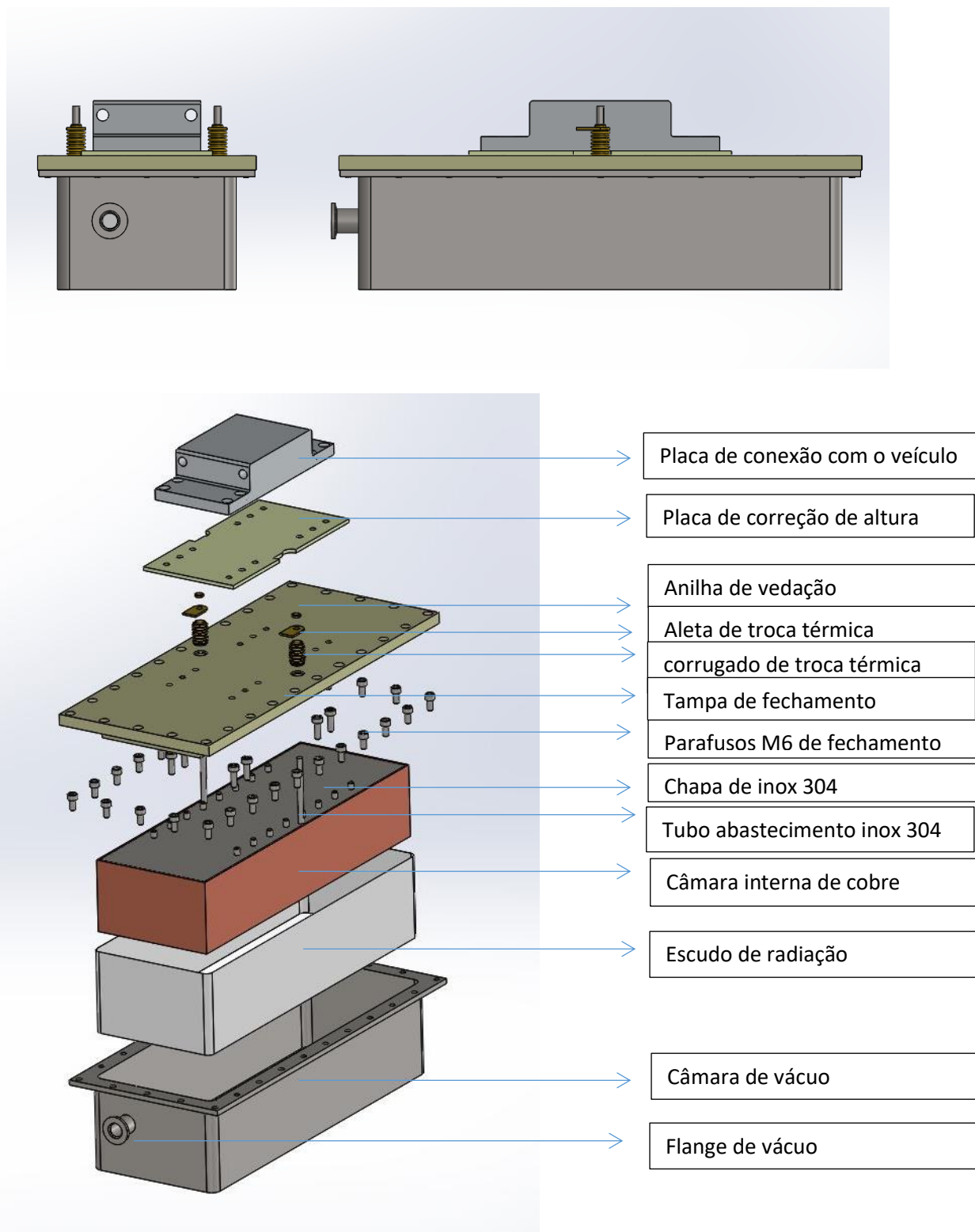


Figura 28 - Aspectos construtivos do Criostato

Na parte inferior da câmara de cobre é possível visualizar os blocos supercondutores (em preto) que estão fixados através de adesivo *Stycast*.

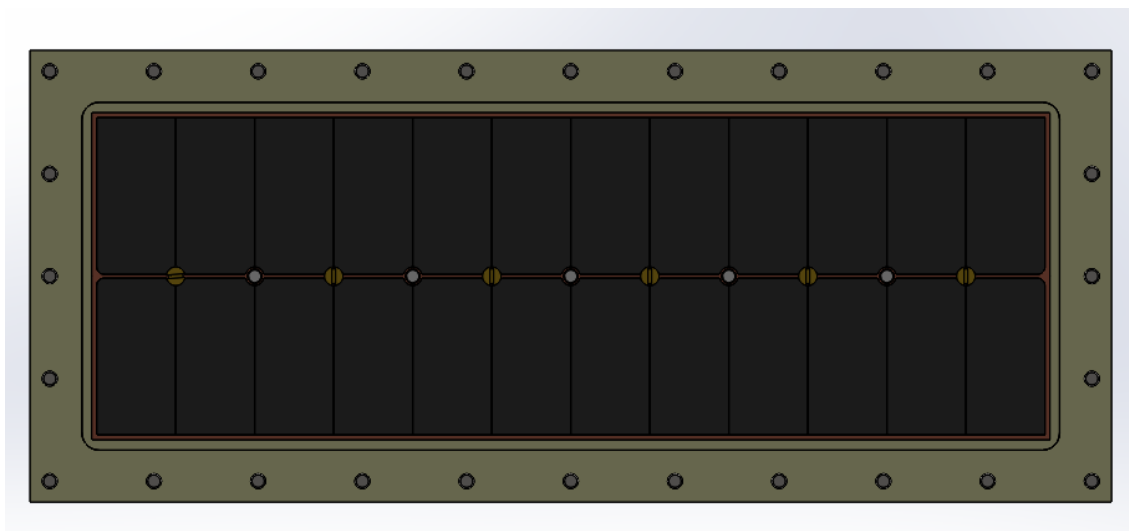


Figura 29 - Parte interior e inferior do criostato com os blocos supercondutores

Cada peça do conjunto do criostato possui funções bem específicas.

Descrição das partes:

- A placa de conexão é uma peça de alumínio externa que possui uma extremidade fixada ao criostato e a outra é fixada no veículo;
- A placa de correção de altura foi inserida posteriormente à fabricação para a correção de um problema de vazamento em alguns criostatos e teve de ser inserida em todos os outros para nivelamento de altura;
- A anilha de vedação é feita de latão e é soldada com liga chumbo-estanho no tubo de abastecimento de LN₂ para vedação;
- A aleta de troca térmica é soldada à anilha e ao corrugado de troca térmica para que o corrugado não fique na temperatura do LN₂ e possa ser colado na sua parte inferior à tampa externa;
- O corrugado é um trocador de calor fabricado em latão para permitir a vedação do tubo de abastecimento que permanece em contato com o LN₂ e, portanto, a -196° C e à tampa que se encontra na temperatura ambiente;
- A tampa de fechamento é fabricada em G10, que é um laminado de fibra de vidro com resina epóxi que é um material isolante térmico de elevada resistência mecânica. Ela é fixada na câmara de vácuo através de parafusos M6. Na parte

interna da tampa são encontradas 3 camadas de transmissão de força, que são placas de G10 intercaladas com pinos de titânio para suportar altas cargas com a mínima transmissão de calor. Entre essas camadas há também folhas de escudos de radiação, *mylar*.

- A chapa de inox faz o fechamento da câmara de cobre, as duas são soldadas com solda prata. A câmara de nitrogênio é fabricada dessa forma para suportar a ciclagem de forças, afinal toda carga que o criostato aguenta é descarregada nesta câmara que contém os blocos supercondutores;
- O tubo de abastecimento é fabricado em inox 304 e é soldado nesta tampa da câmara interna. Neste caso, a função do inox é ser um péssimo condutor térmico.
- A câmara interna de cobre é onde fica armazenado o nitrogênio líquido.
- Os escudos de radiação têm a função de minimizar a entrada de calor por radiação.
- A câmara de vácuo é a camada externa de inox que abriga todo o conjunto e possui um espaço entre a própria parede e a parede da câmara de cobre onde é realizado vácuo.
- O flange de vácuo é um bocal NW16 padrão para conexão em dispositivos de vácuo.

7.2 Análise das Falhas

7.2.1 Problemas de Projeto detectados: Vedação de flange

Vedação do flange na sua superfície superior é feita com um veda flange não indicado para aplicações de vácuo (*loctite* 518) que é um Éster dimetacrilato, composto que sublima na pressão de trabalho. Além disso, não garante a vedação de toda superfície do flange como o exposto na figura a seguir.



Figura 30 - Vedação defeituosa com *loctite*

Solução proposta:

O mais indicado seria *o'ring* de material que não degrade no vácuo, ou seja, que sua pressão parcial de vapor permita que não haja liberação de vapores e nem permeabilidade de moléculas ou vapor de água na câmara de vácuo. Alguns materiais são indicados conforme o *handbook* [30] da Parker. Esta correção só deve ser aplicada em criostatos que apresentarem vazamento no flange ou que necessitem de intervenção que necessite desmontagem.

Weight Loss of Compounds in Vacuum		
Test Samples: Approximately .075" thick		
Vacuum Level: Approximately 1×10^{-4} torr		
Time: 336 hours (two weeks)		
Room Temperature		
Compound Number	Polymer	Percent Weight Loss
B0612-70	Butyl	.18
C0873-70	Neoprene	.13
E0515-80	Ethylene Propylene	.39
E0529-60	Ethylene Propylene	.92
E0692-75	Ethylene Propylene	.76
L0449-65	Fluorosilicone	.28
L0677-70	Fluorosilicone	.25
N0406-60	Nitrile	3.45
N0674-70	Nitrile	1.06
P0648-90	Polyurethane	1.29
S0455-70	Silicone	.03
S0604-70	Silicone	.31
V0747-75	Fluorocarbon	.09
V0884-75	Fluorocarbon	.07
V0894-90	Fluorocarbon	.07

Note: Some of these compounds may no longer be available.

Table 3-19: Weight Loss of Compounds in Vacuum

Figura 31 - Pág. 65 Parker O-Ring Handbook ORD 5700

7.2.2 Avaliação de duração de Levitação:

Tabela 24 - Tabela de ensaios de duração de levitação antes de qualquer intervenção.

Criostato	Primeiro ensaio	Segundo ensaio	Terceiro ensaio	Quarto ensaio	Média
1	21	24	24	Não testado	23,00
2	20,5	23,8	22	Não testado	22,10
3	26	22	22,5	Não testado	23,50
4	26	Não testado	Não testado	Não testado	26,00
5	34	24	24	Não testado	27,33
6	23	25	24,5	Não testado	24,17
7	26	22	Não testado	Não testado	24,00
8	30,5	25	24	Não testado	26,50
9	28	27	Não testado	Não testado	27,50
10	18,5	20	23	22	20,88
11	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado
12	19	20	12	9,5	15,13
13	20	26	26	Não testado	24,00
14	Desabilitado	Desabilitado	Desabilitado	Desabilitado	Desabilitado
15	31	22	24	Não testado	25,67
16	26	25,5	Não testado	Não testado	25,75
17	27	26,5	30	Não testado	27,83
18	Não testado	Não testado	Não testado	Não testado	
19	26	24	Não testado	Não testado	25,00
20	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado
21	26	26	24	Não testado	25,33

22	27	26	27	Não testado	26,67
23	25	26	24	Não testado	25,00
24	20	21	Não testado	Não testado	20,50
25	20	15	16	21	18,00
26	21,5	23,9	22	Não testado	22,47
27	25,5	26,5	Não testado	Não testado	26,00
28	26,2	Não testado	Não testado	Não testado	26,20
Média	24,68	23,79	23,06	17,50	
Total de horas	567,7	547,2	369	52,5	1536,4 [h]

Legenda	
Atenção	entre 20 e 24
Aprovado	maior que 24
Reprovado	menor que 20

Estes testes foram realizados em sequência, não sendo efetuado o procedimento de vácuo entre testes subsequentes.

7.2.3 Problemas de Projeto detectados: Trincas na solda interna

Durante a abertura para manutenção dos criostatos com problemas de rendimento foi constatado que havia um vazamento na solda prata da câmara de LN2. A figura abaixo mostra um conjunto de porosidades que podem ser observadas a olho nu.



Figura 32 - Solda interna da tampa da câmara de LN2

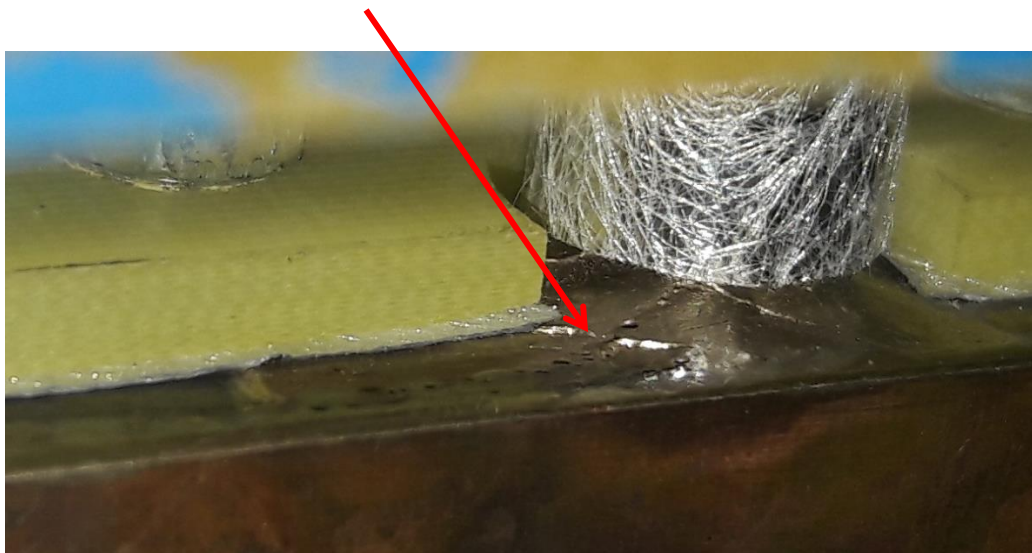


Figura 33 - Zoom das trincas na solda lado esquerdo

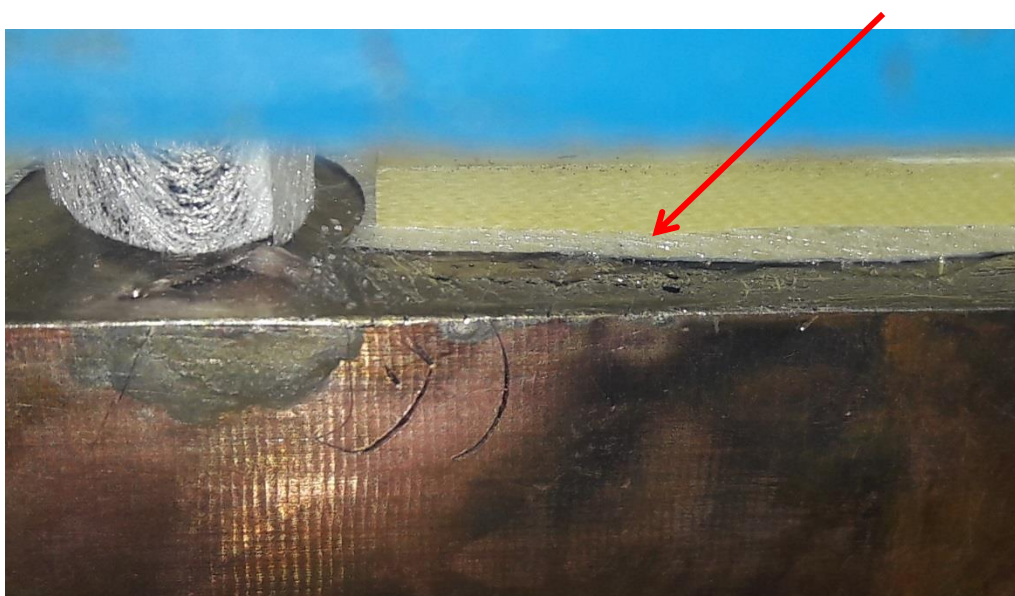


Figura 34 - Zoom nas trincas da solda lado direito

Solução Proposta

Para a correção deste problema não seria possível utilizar novamente solda prata, pois para este procedimento, seria necessário aquecer toda peça que é fabricada em cobre e perde muito calor em um procedimento localizado. O motivo deste impedimento é que as pastilhas supercondutoras não podem ser retiradas de seus alojamentos visto que se encontram coladas nestes locais e este tipo de material não pode ser aquecido acima de 150°C.

Para solução das micro-trincas, um adesivo especial (EP21TCHT-1) para baixa temperatura foi pesquisado e adquirido do fabricante americano *Masterbond*.

Características:

Product Properties

- Mixing ratio, wt. part A/part B 100/60
- Viscosity of mixed compound 75°Flight paste
- Working life after mixing, 75°F;
100 gram batch, minutes 45
- Cure schedule, ambient temperatures , hours 18-24
200°F 1-2
- Tensile shear, aluminum/aluminum, @ 75°F.....
.....2200
- After 30 days water immersion, 75°F, psi 2080
- At 400°F after 1 hour exposure to 400°F, psi 650
- Hardness, Shore D >80
- Thermal conductivity, BTU's in/ft² •hr• °F 10
- Coefficient of thermal expansion, in/in x 10⁻⁶ °C 18-20
- Volume resistivity ohm cm >10¹²
- Dielectric strength, volts/mil. (Kv/mm) 420/16.4
- Service temperature range, °F 4°K to +400°F
- Shelf life at 75°F, in unopened containers, months..... 1 year
- Parts A and B available in pint, quart, 1(one) gallon and 5(five) gallon containers.

Este adesivo foi aplicado no local e apresentou ótimos resultados de duração de vácuo, chegando a 30 horas de levitação.

Para este resultado, os componentes foram misturados utilizando uma balança de precisão, a superfície foi lixada com lixa 80 a fim de garantir uma rugosidade adequada para a resina e a mesma foi aplicada de forma a garantir uma camada homogênea em todo perímetro onde antes havia apenas solda prata como mostra a figura 35 abaixo.

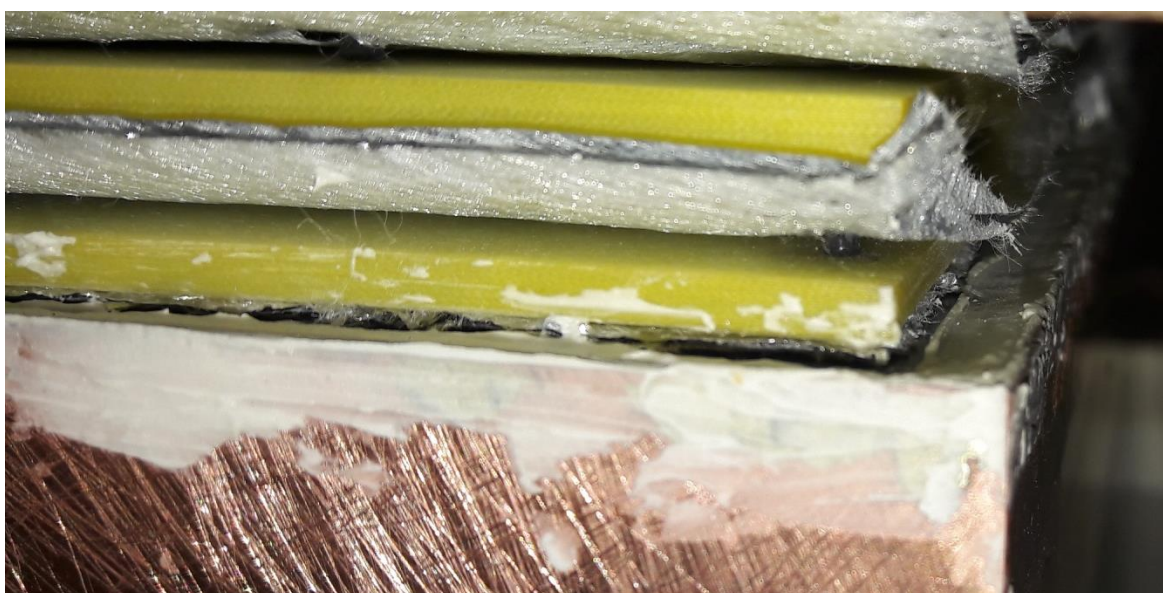


Figura 35 - Aplicação da resina EP21TCHT-1 para fechar micro trincas na solda

O conjunto descansou durante 24 horas antes de ir para a estufa onde ficou por 2 horas a 80° C como manda o manual. Após isto, o fechamento do criostato foi concluído utilizando uma junta plana fabricada em *viton* para a vedação do flange da tampa. Depois desta intervenção o criostato voltou a ser utilizado normalmente no veículo.

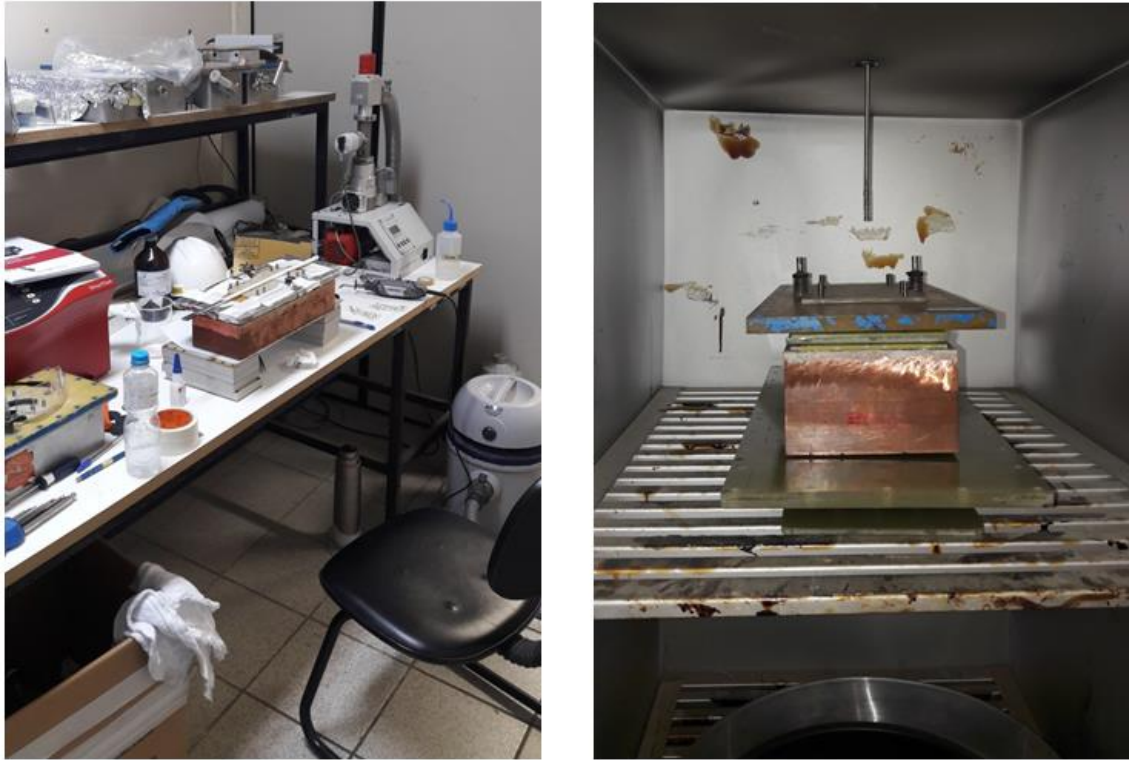


Figura 36 - Espaço de manutenção de criostatos e etapa de cura da resina na estufa

7.3 Manutenção dos criostatos

O procedimento regular de manutenção dos criostatos consiste na realização semanal de bombeamento de vácuo quando a partir de maio de 2017 começou a ser reportado através de uma tabela de acompanhamento com a finalidade de gerar um histórico de comportamento do sistema e identificar quais criostatos devem ser evacuados ao invés de evacuar todos semanalmente. Esta tabela em seu estágio atual pode ser observada a seguir.

Tabela 25 - Acompanhamento semanal de manutenção

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	Taxa de falha com vácuo	Taxa de falha sem vácuo	Criostatos testados	Data	Data	06/06/2017	13/06/2017	20/06/2017	23/06/2017	27/06/2017	04/07/2017	11/07/2017	17/07/2017	24/07/2017	01/08/2017
A (oficina)	11%	20%	1	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac erro	não vac erro	fez vac erro	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	
	0%	10%	2	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac erro	
	0%	0%	3	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	
	0%	20%	4	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac erro	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac erro	
	12%	22%	5	fez vac ok	fez vac ok	fez vac erro	fez vac ok	fez vac ok	não vac erro	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac erro	fazer vac
	11%	10%	6	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac erro	fez vac ok	não vac ok	não vac erro	não vac erro	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	
	22%	10%	7	fez vac erro	fez vac erro	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac ok	não vac erro	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	
	11%	0%	8	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac erro	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	
	22%	0%	9	fez vac erro	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac erro	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	
	36%	0%	10	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac erro	fez vac erro	fez vac erro	fez vac ok	não vac ok	fazer vac
	0%	0%	11	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	
	11%	0%	12	fez vac ok	fez vac erro	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	
B (rua)	0%	11%	1	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac erro	fazer vac
	12%	11%	2	fez vac ok	fez vac erro	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac erro	fez vac ok	não vac ok	fazer vac
	12%	11%	3	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac erro	fez vac ok	não vac ok	fazer vac
	12%	22%	4	fez vac ok	fez vac erro	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac erro	fez vac ok	não vac erro	fazer vac
	60%	11%	5	fez vac erro	fez vac erro	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac erro	fez vac erro	fez vac ok	não vac erro	não vac ok	fazer vac
	33%	10%	6	fez vac erro	fez vac ok	fez vac erro	fez vac ok	fez vac ok	não vac erro	fez vac erro	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	
	0%	33%	7	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac erro	fez vac ok	não vac ok	não vac erro	fez vac ok	não vac erro	não vac ok	fazer vac
	12%	33%	8	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac erro	fez vac ok	não vac erro	fez vac ok	fez vac ok	não vac erro	fez vac ok	não vac erro	fazer vac
	0%	10%	9	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac erro	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	
	0%	20%	10	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac erro	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac erro	fez vac ok	
	0%	0%	11	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	
	0%	0%	12	fez vac ok	fez vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	não vac ok	

Nela os Criostatos foram separados em 2 grupos em lados distintos do veículo (lado A e lado B) e a seguinte legenda para o sistema de cores pode ser entendida como:

	Neste dia de teste foi realizado vácuo e não houve problema.
	Neste dia de teste foi realizado vácuo, porém houve problema.
	Neste dia de teste não foi realizado vácuo e não houve problema.
	Neste dia de teste não foi realizado vácuo e houve problema.
	Deve-se realizar procedimento de vácuo para o próximo teste.

Ainda sobre este sistema de cores podemos definir as seguintes conclusões:

	Não se pode dizer nada, pois foi realizado vácuo e não houve problema. Este pode estar mascarado pela realização prévia do vácuo.
	Problema detectado! Mesmo após a realização de vácuo apresentou falha.
	Bom sinal! O procedimento de vácuo não foi realizado no dia anterior e mesmo assim não apresentou falha.
	Há necessidade de evacuar mais uma vez, pois houve falha sem a realização do vácuo prévio.

7.4 Operação Atual

Atualmente o procedimento de evacuação dos criostatos é realizado as segundas-feiras e na terça feira é realizado o abastecimento para o veículo operar das 11 da manhã as 15 horas transportando pessoas durante este período.

Durante o procedimento de abastecimento o veículo fica apoiado sobre rodas em uma estrutura metálica para a realização do *field cooling* que nesta situação tem uma distância nominal de 35 mm de afastamento entre o criostato e o trilho. Há uma demanda em se determinar qual seria de fato o FC ótimo para o veículo uma vez que esta estrutura foi construída de forma fixa sem possibilidade de alteração de altura como mostra a figura a seguir.

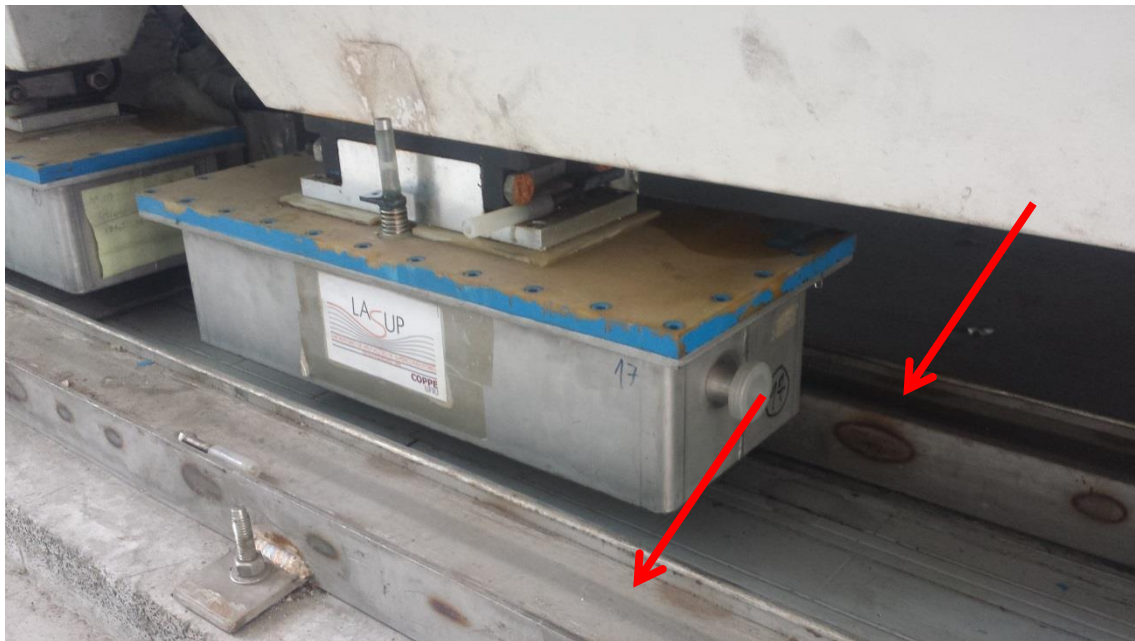


Figura 37 - Estrutura de Field Cooling

7.4.1 Altura de Levitação ideal

Uma vez superado o problema de duração de levitação por perda de vácuo se faz necessário definir as curvas de levitação dependentes da posição de *field cooling*. Estes dados serão adquiridos através de ensaios de carga em levitação variando os parâmetros de FC.

Capítulo 8 – Medições de força de Levitação

Nos sistemas de movimentação que utilizam a levitação supercondutora é extremamente importante aproveitar ao máximo a força de levitação tanto por questões de eficiência quanto por questões de segurança na operação.

Para determinar quanta carga o sistema de suspensão magnética suporta é possível utilizar modelos e simulações numéricas ou ensaios físicos em laboratório.

Tão importante quanto utilizar um modelo matemático adequado é realizar ensaios de forma coerente com a aplicação da levitação.

Para determinação da altura ideal de levitação do Maglev foram realizados alguns testes de bancada em laboratório, onde procurou-se reproduzir as condições reais de operação. Optou-se pela realização de testes pelo fato da modelagem do fenômeno da levitação ainda ser um assunto não totalmente dominado pelos pesquisadores ao redor do mundo. Diversas teorias tentam reproduzir matematicamente os resultados experimentais sem sucesso.

Além disso, grande parte das teorias e formulações propostas são para supercondutores do tipo I, refs. [31][32][33], que é a versão de supercondutor sem imperfeições e que não é adequada para levitação. Os supercondutores utilizados no Maglev Cobra são do tipo II, já mencionados na seção 7.1.2.

8.1 A curva da banana

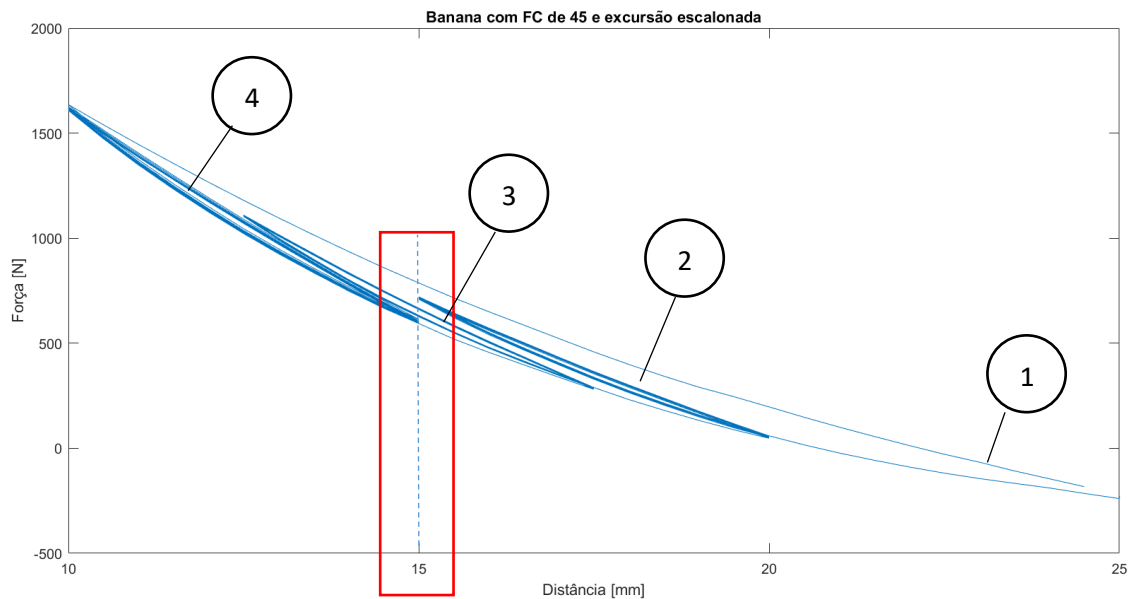


Figura 38 - Curva da Banana

A curva mais utilizada para caracterizar um mancal supercondutor é a curva da banana que representa um gráfico força versus deslocamento entre um supercondutor e um ímã [34].

Porém, a força de repulsão entre um ímã e um supercondutor é um mecanismo complicado de ser analisado. O que se pode afirmar é que a força aumenta quando o supercondutor se aproxima do ímã e diminui quando se afasta. No entanto, ela é diferente quando os dois estão se afastando ou se aproximando. Quando o ímã se aproxima, o campo crítico inferior é alcançado e cada vez mais fluxo penetra no supercondutor. Quando o ímã se afasta, a força repulsiva entre o ímã e a sua imagem diminuem. Além disso, as linhas de fluxo penetradas (*flux pinning*) causam uma força atrativa que reduz a força repulsiva líquida. Isso resulta em uma curva de força vs. distância com histerese.

Ainda, a posição de equilíbrio depende da amplitude da excursão que o supercondutor realizou no campo magnético do ímã. Como pode ser visto na figura (38) existem 4 curvas banana medidas para um mesmo conjunto de ímã e supercondutor. A primeira curva com o maior deslocamento é a curva de deslocamento de 25 a 10 mm onde é possível observar a maior banana. As três curvas (2,3,4) seguintes são deslocamentos

(20 a 15mm), (17,5 a 12,5mm) e de (15 a 10 mm) ficando então impossível determinar o par ordenado (posição, força) sem saber o histórico de deslocamento do conjunto.

Pode-se tomar como exemplo a posição de 15 mm nas diferentes curvas. Para saber a força associada a esta posição é necessário saber qual foi o deslocamento realizado em torno desta posição.

8.2 Equações dinâmicas

Huang et al. (2017) [35], em seu artigo tenta modelar o comportamento dinâmico da levitação entre um supercondutor e um ímã utilizando a seguinte geometria:

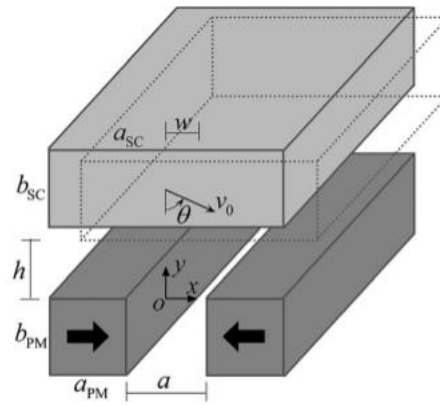


Figura 39 - modelagem Levitação Supercondutora, Huang et al [35].

Onde o supercondutor se encontra sobre dois ímãs de magnetização horizontal que se encontram na parte inferior do modelo. São considerados ambos infinitos e que a refrigeração do supercondutor ocorreu em uma altura inicial infinita (h_{∞}). O supercondutor desce em uma velocidade muito pequena (v_{∞}) e atinge a altura de trabalho (h_0). A partir daí recebe uma perturbação que possui velocidade inicial de acordo com a equação:

$$v_0 = v_{0x}X + v_{0y}Y \quad (8.1)$$

E, de acordo com a segunda Lei de Newton em duas dimensões:

$$m\ddot{w} - F_X = 0 \quad (8.2)$$

$$m\ddot{h} + mg - F_Y = 0 \quad (8.3)$$

Rotações são ignoradas para simplicidade.

O deslocamento lateral é denotado por (w), a separação entre ímãs é chamada de (a), a seção transversal do ímã (bpm x abm) e a seção do supercondutor (bsc x asc).

8.3 Equações Eletromagnéticas

O sistema utiliza a formulação A-V das equações de Maxuell que são utilizadas de forma discretizada.

Para uma geometria longa, o campo elétrico \mathbf{E} e o vetor potencial \mathbf{A} no supercondutor são orientados ao longo da direção Z. Dessa forma, o campo elétrico em qualquer ponto pode ser expressado como:

$$\mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \frac{\partial V}{\partial z} \quad (8.4)$$

Em que V é o vetor potencial elétrico escalar e para o problema 2D $\frac{\partial V}{\partial z}$ é uma constante chamada de $\vartheta = \frac{\partial V}{\partial z}$.

O vetor potencial pode ser definido como:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_{pm} + \mathbf{A}_{sc} \quad (8.5)$$

Na qual, \mathbf{A}_{sc} é o vetor potencial gerado pela corrente de blindagem J no supercondutor e \mathbf{A}_{pm} é o vetor potencial dos ímãs.

A equação de *Poisson* para o problema 2D:

$$\Delta \mathbf{A}_{sc} = -\mu_0 \mathbf{J} \quad (8.6)$$

$$\mathbf{A}_{sc}(r) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \mathbf{J}(r') \ln[(x - x')^2 + (y - y')^2] dS' \quad (8.7)$$

Em que μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo e S é a seção transversal do supercondutor.

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}_{pm}}{\partial t} - \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S \mathbf{J}(r') \ln[(x - x')^2 + (y - y')^2] dS' - \vartheta \quad (8.8)$$

Para o supercondutor que possui uma relação corrente-voltagem altamente não linear utiliza-se a chamada Power Law [36,37,38,39]:

$$E = E_0 \left(\frac{J}{J_C} \right)^n \quad (8.9)$$

E_0 é o campo elétrico crítico e vale usualmente (10^{-4} V/m), J_C é a densidade de corrente crítica e o expoente n é o chamado expoente de *creep* que está relacionado ao decaimento da magnetização com o tempo e ao material. Quanto maior o valor de n , mais o modelo se aproxima do modelo de estado crítico e melhor é o supercondutor, pois menor é a resistividade para uma dada corrente.

Para resolver o problema numericamente deve-se dividir a região do supercondutor em N elementos retangulares de área $\Delta S = \Delta x \times \Delta y$, assim:

$$N = a_{sc} / \Delta x \times b_{pm} / \Delta y \quad (8.10)$$

Para resolver o sistema em termos de i , utiliza-se uma aproximação da equação (8.8) na forma dos resíduos ponderados [40], [41].

$$E_i + \frac{dA_i^{pm}}{dt} + \sum_{j=1}^N M_{ij} \frac{dI_j}{dt} + \vartheta = 0 \quad (8.11)$$

Na qual,

$$M_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi\Delta S^2} \int_{S_i} \int_{S_j} \ln[(x - x')^2 + (y - y')^2] dS dS' \quad (8.12)$$

No caso de i variando de 1 a N , a equação pode ser discretizada na forma a seguir:

$$M \frac{dI}{dt} + E + \frac{dA^{pm}}{dt} + \vartheta \mathbf{1} = 0 \quad (8.13)$$

Nesta, $\mathbf{1}$ é o vetor unidade e combinando a equação (8.9) com a condição $\mathbf{1}^T \mathbf{I} = 0$ para o supercondutor, a equação (8.13) pode ser reescrita como:

$$M \frac{dI}{dt} + \frac{E_0}{I_C^n} T I^n + T \frac{dA^{pm}}{dt} = 0 \quad (8.14)$$

Definindo: $I_C = \Delta S J_C$, $T = I_N - \frac{\mathbf{1} \mathbf{1}^T M^{-1}}{\mathbf{1}^T M^{-1} \mathbf{1}}$, e I_N é a matriz identidade.

8.4 Procedimento

- I. Conhecendo a evolução temporal do vetor potencial produzido pelo trilho na região do supercondutor, é possível obter o perfil de corrente no supercondutor em qualquer instante resolvendo a equação (8.14);
- II. De posse do perfil de correntes obtido por (I), as forças F_x e F_y podem ser calculadas através das equações abaixo:

$$F_X = -\sum_{i=1}^N I_i B_{y,i} \quad \text{e} \quad F_Y = -\sum_{i=1}^N I_i B_{x,i}$$

Onde F_y é a força de levitação e F_x é a força de *Pinning* lateral.

O procedimento sugerido por *Huang et al.* fornece resultados aproximados e dependem fortemente da geometria do trilho, velocidade de aproximação e altura de levitação. Porém, este modelo não serve para quando o processo de resfriamento do supercondutor (FC) ocorre na presença de campo (caso da levitação do Maglev), mas serve para ilustrar a dificuldade de modelagem de um caso prático e real. Por este motivo a abordagem experimental foi utilizada.

8.5 Aparato Experimental

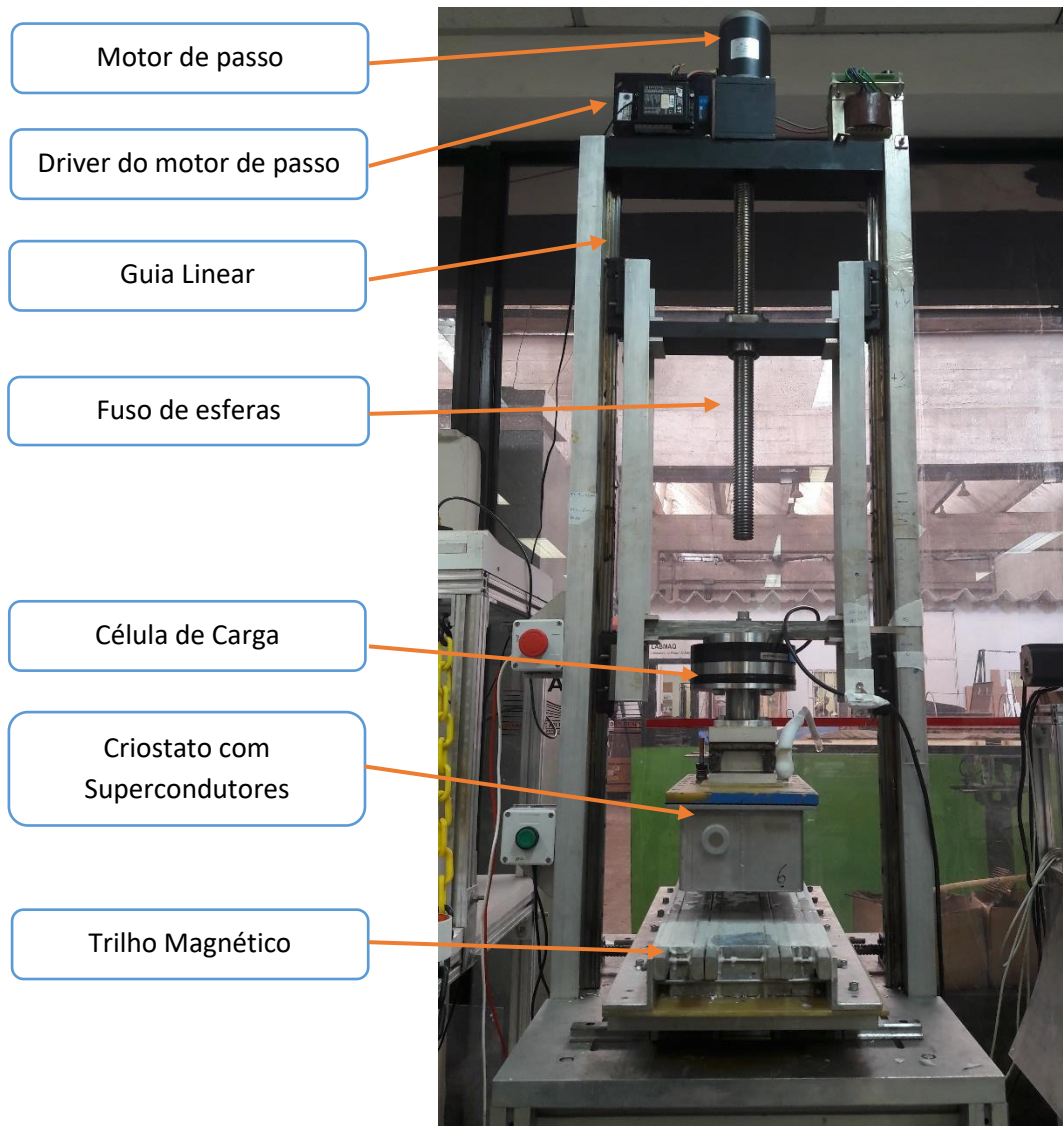


Figura 40 - Sistema de medição de força de Levitação.

O sistema de ensaio de força de levitação é ilustrado na figura 40 e permite a realização de movimentação na direção vertical. O equipamento é conectado a um computador que utiliza o software *Labview* tanto para o controle da movimentação quanto para a aquisição dos dados da célula de carga.

Toda bancada é construída em alumínio e aço inox 304 para evitar a dissipação de fluxo magnético do trilho.

As configurações de ensaio são listadas na tabela 26.

Tabela 26 Configurações de ensaio.

Configurações de ensaio	
Passo	0,5mm
Velocidade	3mm/s
Taxa de amostragem	10kHz
Resolução	3/4N
Tempo de espera após mov.	10min

8.6 Abordagem Experimental

Para realização dos testes de levitação em bancada, procurou-se evitar o problema da curva da banana e se aproximar mais do comportamento do veículo ao longo do tempo de operação.

Foram investigadas 3 posições de *Field Cooling* (refrigeração da cerâmica na presença de campo magnético). Posição utilizada atualmente pelo Maglev (35mm) e outras 2 posições (45mm e 55mm) de altura inicial entre o supercondutor e o trilho. Para avaliar a força em função do gap de levitação ao longo do dia o procedimento utilizado foi o seguinte:

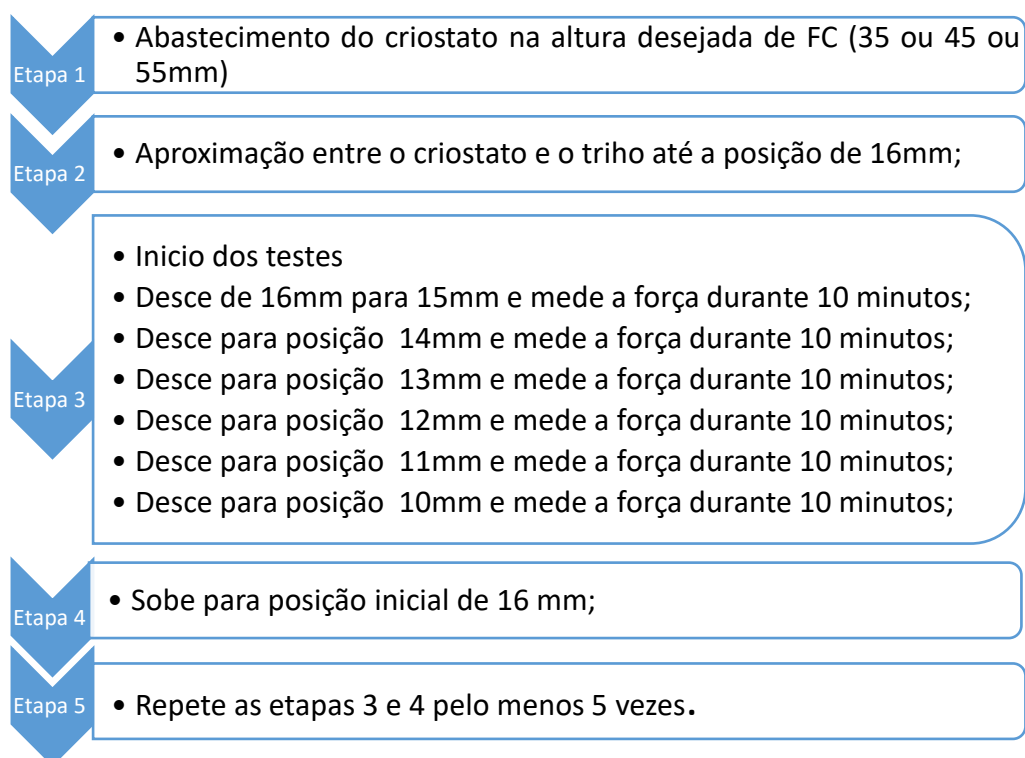


Figura 41 - Fluxograma de ensaios

Com este procedimento, simula-se carregamentos graduais no criostato ao longo do dia da mesma forma que acontece com o veículo com a entrada e a saída de passageiros à cada viagem. É impossível, porém repetir o carregamento exato que o veículo sofre com o transporte de passageiros durante seu período de trabalho, pois a distribuição de carga do veículo não é homogênea e nem sempre os passageiros se posicionarão no mesmo lugar no interior do veículo.

Com a metodologia de testes proposta é possível avaliar a curva de força por deslocamento ao longo do tempo de forma discreta fazendo a média de cada período de 10 minutos avaliado e traçar a curva destes pontos para cada posição (10,11,12,13,14e 15mm).

O primeiro ciclo de ensaios representa o chamado bombeamento de campo quando o supercondutor é pressionando pela primeira vez contra o campo magnético do ímã, essa ação causa um stress na rede *pinning* e tem como consequência o chamado *Flux Creep* e, por tanto, decaimento da força de levitação. Este *Creep* do primeiro ciclo é mais acentuado do que nos outros ciclos de ensaios e pode ser observado nos três gráficos a seguir que representam o primeiro ciclo de teste para cada altura de FC. Outra observação é que a força de levitação sempre é maior durante o bombeamento de campo do que durante as demais etapas de testes.

Este fenômeno pode ser observado nas figuras 42,43,44 a seguir:

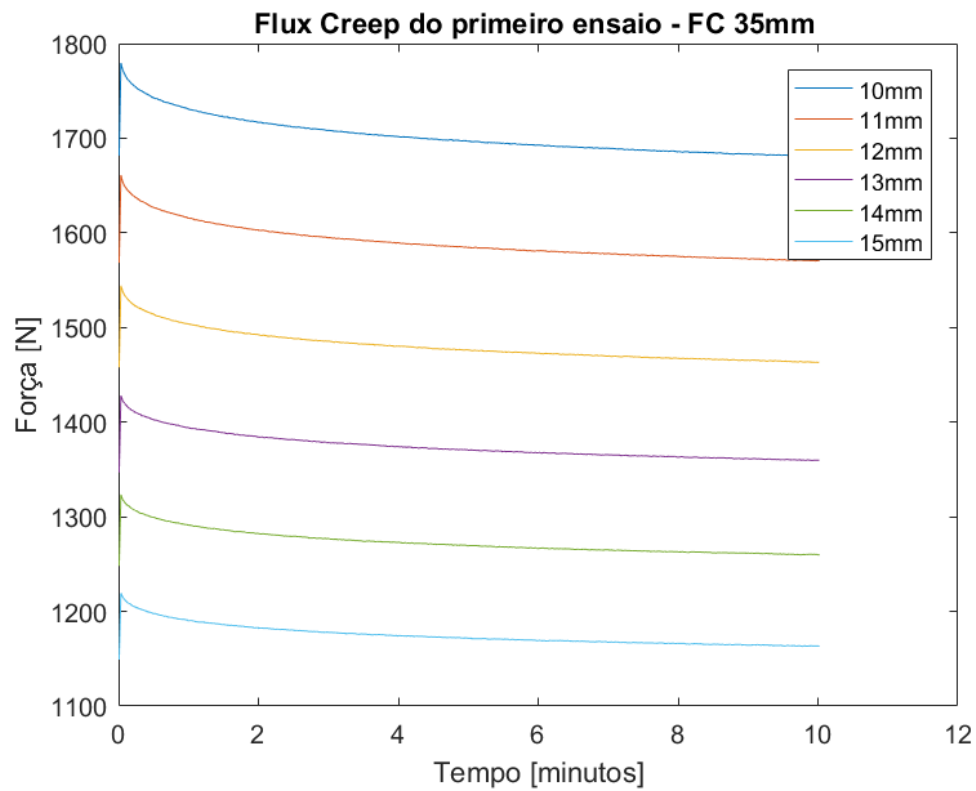


Figura 42 - Primeiro ciclo de ensaios para FC 35.

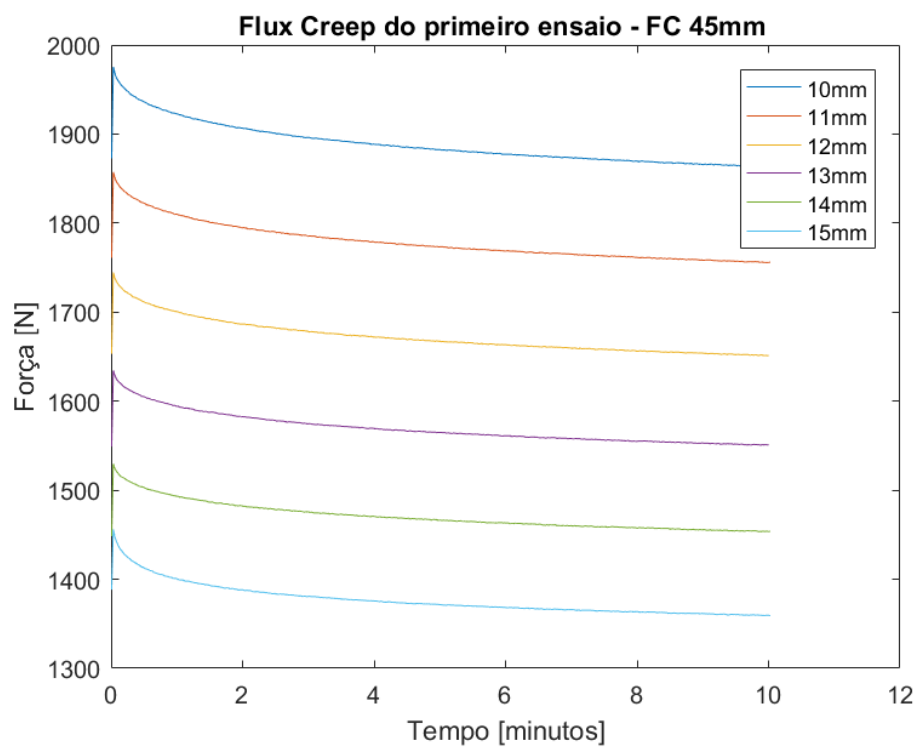


Figura 43 - Primeiro ciclo de ensaios para FC 45.

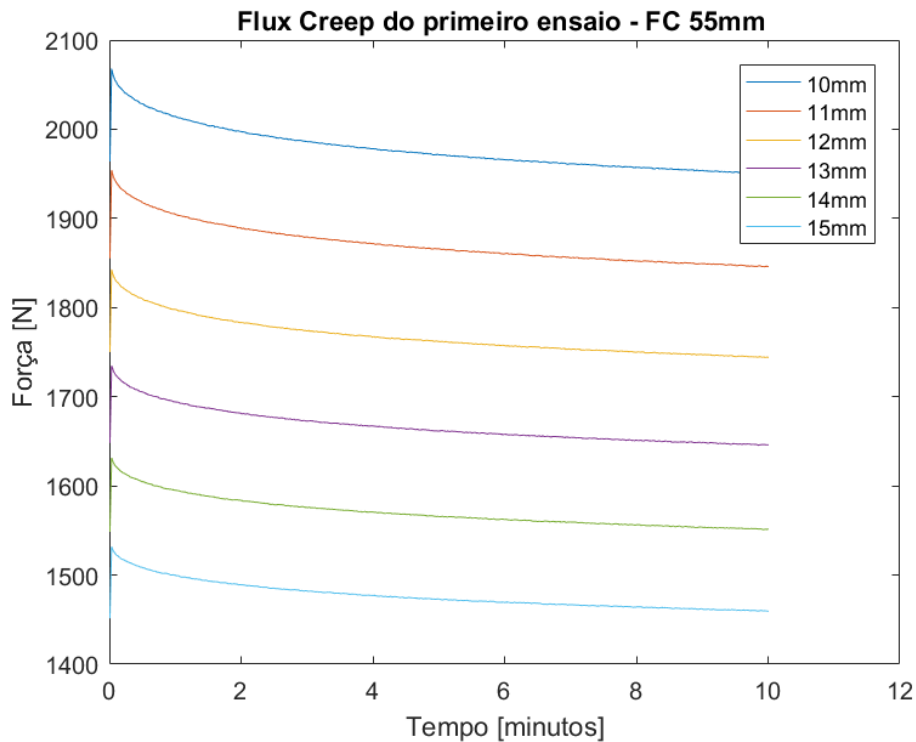


Figura 44 - Primeiro ciclo de ensaios para FC 55.

Para observar a força de levitação ao longo das horas, foi utilizada a média de força medida ao longo dos 10 minutos como uma representação da capacidade do criostato nesta janela de tempo. Com a realização de diversos ciclos de testes com pelo menos 1 hora de intervalo entre eles foi possível utilizar cada ponto de média ao longo das horas para traçar os gráficos.

As figuras a seguir mostram os resultados experimentais com a utilização da metodologia citada:

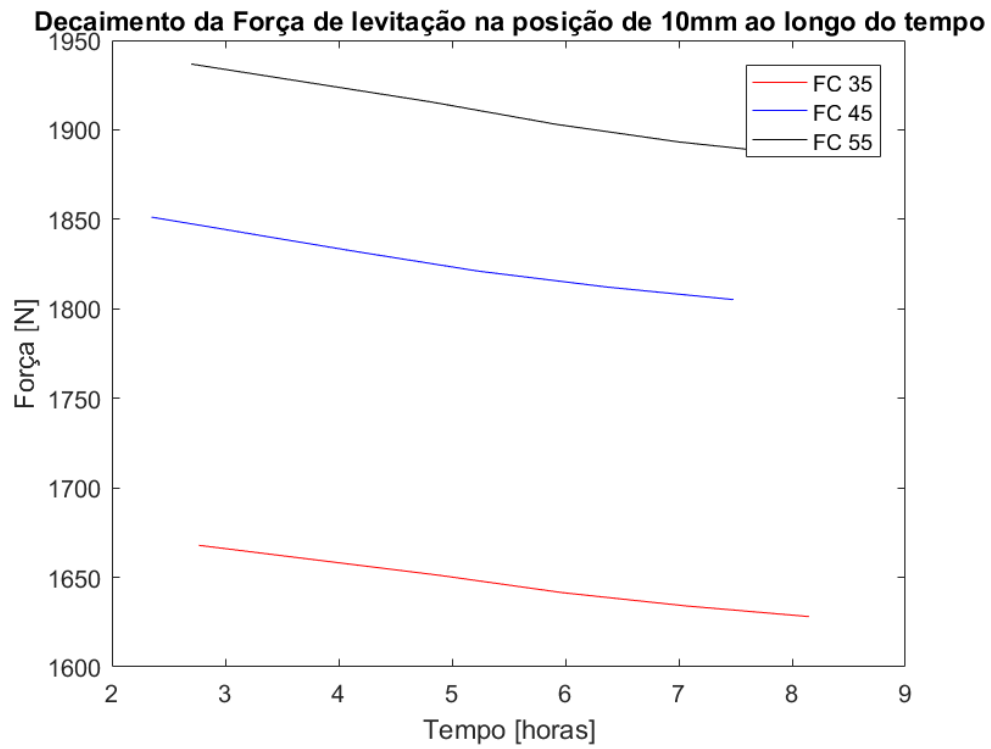


Figura 45 - Decaimento para vários FC's na posição de 10mm.

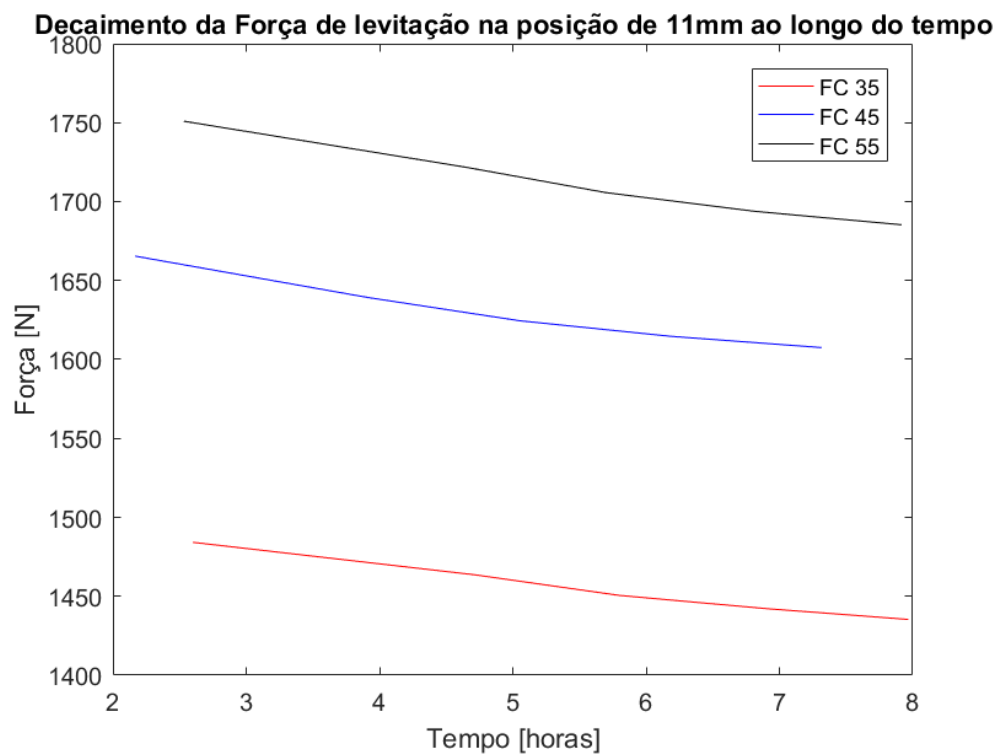


Figura 46 - Decaimento para vários FC's na posição de 11mm.

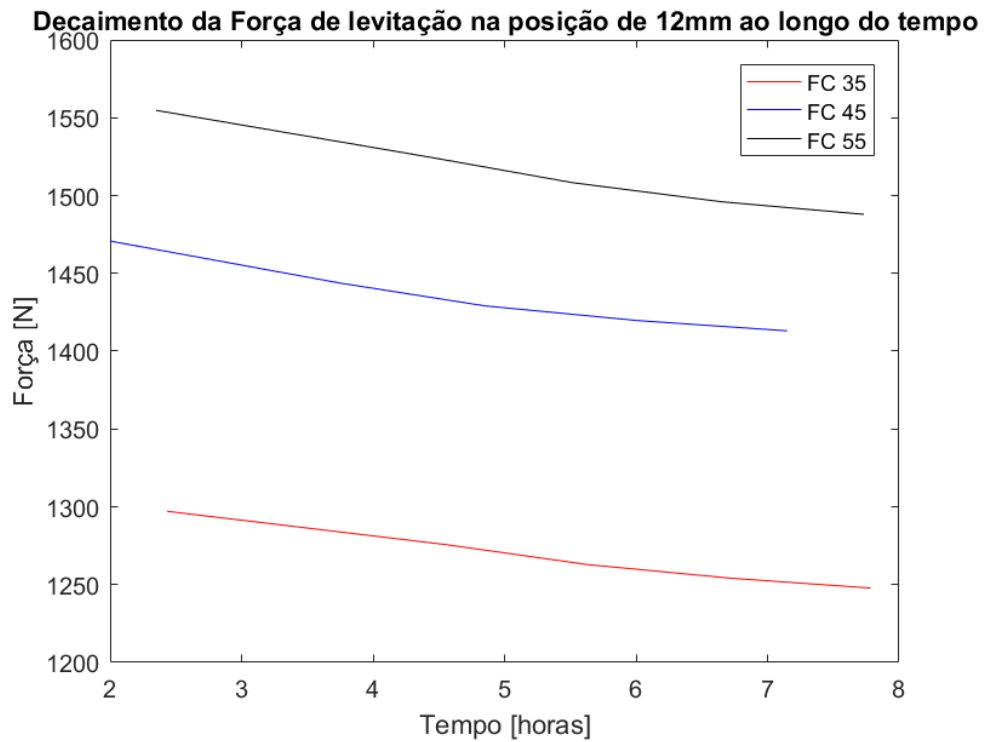


Figura 47 - Decaimento para vários FC's na posição de 12mm.

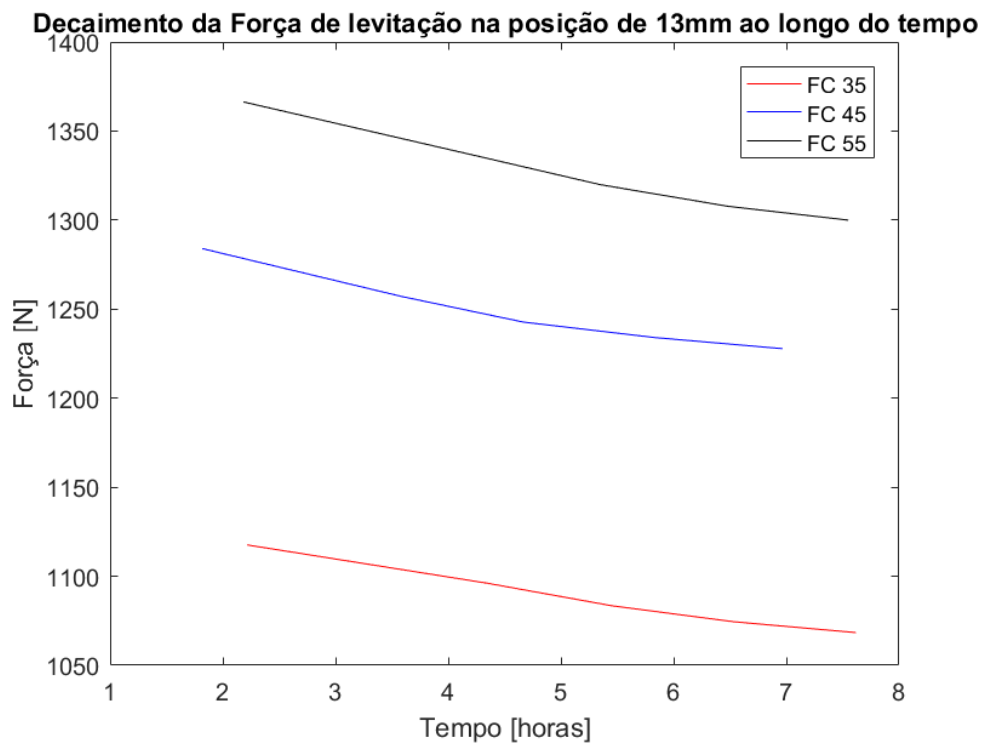


Figura 48 - Decaimento para vários FC's na posição de 13mm.

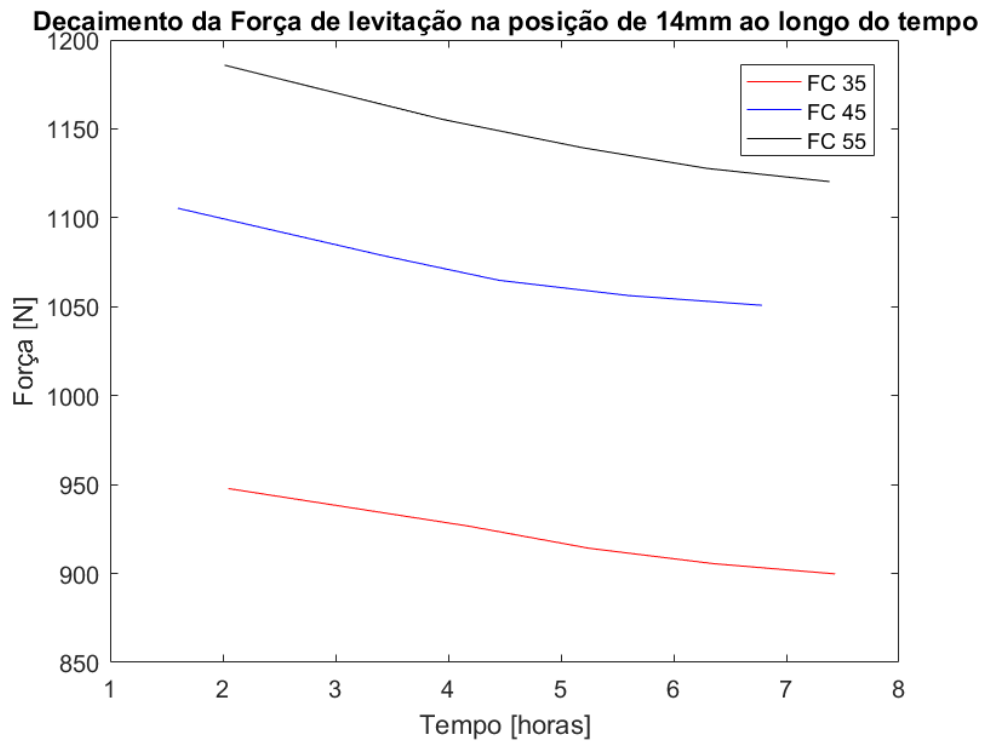


Figura 49 - Decaimento para vários FC's na posição de 14mm.

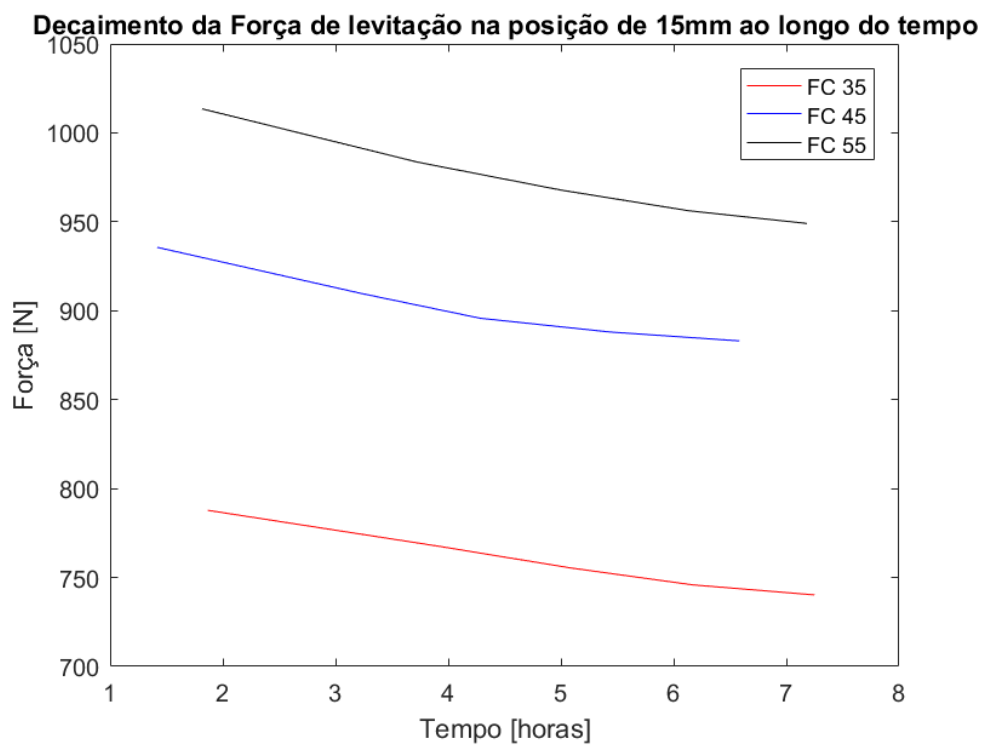


Figura 50 - Decaimento para vários FC's na posição de 15mm.

Com esses resultados é possível observar o decaimento da força de levitação para diferentes alturas de FC e saber quanto de carga o veículo pode transportar ao longo do tempo de operação dependendo da altura de *Field Cooling* utilizada.

Os dados também podem ser analisados na forma de tabela como segue abaixo:

Tabela 27 Média das forças de levitação nos ensaios com FC35.

FC (35) Ensaios - Médias de força [N]						Perda acumulada
mm	2	3	4	5	6	
10	1667,90	1651,20	1641,52	1634,04	1628,09	2,4%
11	1484,18	1463,59	1450,55	1442,21	1435,34	3,3%
12	1297,11	1275,76	1262,84	1254,15	1247,79	3,8%
13	1117,60	1096,08	1083,46	1074,47	1068,38	4,4%
14	947,76	926,61	914,19	905,55	899,77	5,1%
15	787,78	767,73	755,41	745,88	740,21	6,0%

Tabela 28 Média das forças de levitação nos ensaios com FC45.

FC (45) Ensaios - Médias de força [N]						Perda acumulada
mm	2	3	4	5	6	
10	1851,23	1832,55	1821,05	1812,18	1805,15	2,5%
11	1665,48	1639,21	1624,55	1614,68	1607,53	3,5%
12	1470,76	1443,73	1429,11	1419,64	1413,06	3,9%
13	1284,01	1257,16	1242,73	1234,04	1227,79	4,4%
14	1105,37	1078,80	1064,85	1056,28	1050,79	4,9%
15	935,65	909,64	895,77	888,04	883,03	5,6%

Tabela 29 Média das forças de levitação nos ensaios com FC55.

FC (55) Ensaios - Médias de força [N]						Perda acumulada
mm	2	3	4	5	6	
10	1936,73	1915,56	1903,08	1893,23	1885,89	2,6%
11	1750,90	1721,99	1705,69	1693,83	1685,33	3,7%
12	1554,74	1524,63	1508,27	1496,01	1487,93	4,3%
13	1366,34	1336,08	1319,88	1307,74	1299,97	4,9%
14	1185,78	1155,57	1139,47	1127,74	1120,33	5,5%
15	1013,49	983,47	967,83	956,21	949,05	6,4%

Sendo o peso do veículo igual 2300 Kgf (22540 N), o número de passageiros deve ser limitado de forma segura, uma vez que a quantidade de criostatos é fixada em 24 unidades neste projeto.

Dessa forma, os seguintes cenários são possíveis ao final de 7 horas de operação com 10 mm de gap de levitação:

Tabela 30 - Capacidade de transporte de carga de passageiros

Altura de FC	Capacidade unitária [N]	Capacidade total [N]	Capacidade de carga menos o peso do veículo	Quantidade de passageiros (80kgf/pessoa)	Coeficiente de Segurança com 20 passageiros	Coeficiente de Segurança com 15 passageiros
35 mm	1628 N	39072 N	16532 N	21	1,05	1,40
45 mm	1805 N	43320 N	20780 N	26	1,32	1,76
55 mm	1885 N	45240 N	22700 N	28	1,44	1,93

Conforme a tabela 30, considerando que cada passageiro pesa em média 80 Kgf, é possível estimar a capacidade de transporte do veículo para cada altura de FC.

Os testes mostram que o decaimento da força é pequeno (2,4% a 6,4%) para um período de até oito horas depois do abastecimento e que, quando o criostato trabalha mais carregado e mais próximo do trilho a perda de força de levitação é menor.

Outro resultado é que o carregamento progressivo quase-estático utilizado não mostra um decaimento logarítmico como se observa nos testes dinâmicos tipo banana. Talvez porque na realização dos testes tipo banana há a movimentação de um condutor (supercondutor) no campo magnético do ímã, causando além do *creep*, indução de correntes no interior do supercondutor durante o movimento o que por sua vez gera forças repulsivas no sistema aumentando a força de levitação.

Com o tipo de ensaios apresentado é possível prever o comportamento do criostato ao longo do tempo de operação, bastando saber qual foi o FC utilizado e em que posição os criostatos se encontram do trilho. Esta última informação pode ser facilmente obtida com a utilização de sensores de distância no veículo.

Os gráficos das figuras 42, 43, 44 representam as curvas de bombeamento de campo magnético no primeiro ciclo de ensaios explica porque o Maglev Cobra levita mais alto nas primeiras viagens causando a colisão dos mancais de segurança do motor linear, provocando leve desconforto aos passageiros.

Estes dados preliminares sugerem que seria interessante alterar a altura de *Field Cooling* utilizada atualmente no Maglev Cobra de FC35 para FC45 gerando um aumento de capacidade de carga transportada. Para esta alteração seria necessário investigar também o comportamento da força lateral que mantém o veículo no caminho do trilho.

9 Conclusões

Através do estudo realizado fica claro que para o sistema de levitação operar de forma segura transportando passageiros ele deve seguir alguma orientação de segurança e que no caso deste projeto, a norma mais indicada é a EN 50.126.

Através das orientações da regulação selecionada, uma visão geral do sistema pode ser gerada (tabela 33). Depois de elaborada a hierarquia de componentes foi possível designar um modo de falha associado a cada item e avaliá-los com relação à severidade da falha caso ela ocorra, a frequência de ocorrência destes modos de falha e a probabilidade de detecção do modo de falha. O resultado desta análise apontou o criostato como item crítico.

Com atenção especial a este equipamento, testes de duração de levitação foram realizados e foi constatado que o rendimento não era o esperado (tabela 24). Três criostatos reprovados foram selecionados para abertura com a finalidade de investigação onde foram achadas falhas no projeto de selo da tampa e falhas na soldagem interna da câmara de nitrogênio. Estes problemas foram corrigidos utilizando uma junta plana de *viton* para a estanqueidade da câmara de vácuo e foi utilizado um adesivo especial de

uso criogênico para resolver o problema das trincas da solda. Desta forma, as ocorrências mecânicas foram sanadas. Tais modificações devem ser levadas em conta nos projetos futuros de criostatos fabricados.

Também foi verificado através de cálculos termodinâmicos que a pressão de vácuo ideal deve ser a partir de 10^{-4} mbar onde a entrada de calor fica na ordem de 3 a 4 W e a duração da levitação deve durar em torno de 24 horas para o volume de nitrogênio líquido utilizado.

Assim como descrito na literatura, foi comprovado através de testes de força que a distância que o criostato se encontra do trilho no momento do abastecimento faz diferença na força de levitação do sistema. Este procedimento é chamado de *field cooling* e deve ser cuidadosamente selecionado para maior segurança do sistema.

Durante os testes de força de levitação, foi possível observar que uma curva de aproximação de amplitude na faixa de 5 mm já não representava a carga real suportada pelo levitador e para saber a carga útil para cada altura de levitação um ensaio estático deveria ser utilizado. Com isso, uma nova metodologia de ensaios foi adotada para se aproximar o máximo possível do comportamento do veículo durante a sua operação. Esta rotina foi descrita na figura 41. Ao utilizá-la foi possível observar que a força de levitação para o criostato é menor do que se esperava para distância de 10mm, porém o decaimento medido ao longo do tempo foi menor do que o estimado conforme as tabelas 27, 28 e 29. Esses dados deverão ser confirmados quando forem instalados sensores de altura no veículo.

Através dos testes o número de passageiros dentro do veículo pode ser avaliado com maior confiança e um coeficiente de segurança agora pode ser aplicado conforme a tabela 30. Assim, o modo de falha - perda de levitação por excesso de carga pode ser mitigado. Com as correções de projeto já citadas como a correção da vedação e das trincas internas, o modo de falha de perda de vácuo pode ser mitigado.

Todos estes resultados contribuem para uma melhora no índice de criticidade, levando o índice de probabilidade de ocorrência para:

Tabela 31 – Criticidade anterior ao estudo

Nível 3	Endereço do item	Modo de Falha	Severidade	Ocorrência	Deteção	Criticidade
Criostato	M1.8.1.0	Perda de vácuo	8	8	4	256
		Perda de levitação	10	7	5	350

Tabela 32 – Criticidade após o estudo

Nível 3	Endereço do item	Modo de Falha	Severidade	Ocorrência	Deteção	Criticidade
Criostato	M1.8.1.0	Perda de vácuo	8	3	4	96
		Perda de levitação	10	3	5	150

Para melhorar ainda mais a confiabilidade do sistema, deve-se melhorar a capacidade de detecção da perda de vácuo e para isso, sensores de vácuo necessitam ser instalados em cada unidade de criostato, opção que atualmente é inviável pela ausência de porta de sensoriamento. Para melhorar a capacidade de detecção da perda de levitação, sensores de altura devem ser instalados no veículo medindo o gap de levitação de cada vagão constantemente.

Através destas medidas preventivas a criticidade do sistema de levitação deve passar para um nível considerado baixo.

9.1 Trabalhos futuros

Como proposta de trabalhos futuros existe as tarefas de se projetar e construir um levitador que ofereça maior força de levitação, opere com um ciclo fechado de refrigeração e possa ser instrumentado de forma adequada para ser utilizado no transporte de passageiros de forma segura.

Este novo equipamento deverá ser avaliado quanto aos critérios expostos neste trabalho e uma análise dinâmica poderá ser realizada com a modelagem exposta no capítulo 7.1.3.

Para o sistema global, a mesma análise deverá ser realizada para todos os componentes de nível de criticidade considerado alto. Com isso será possível levar esta tecnologia aos níveis de segurança de sistemas utilizados atualmente nos meios de transporte de passageiros que possuem certificação de segurança para operar.

Bibliografia

- [1] G. G. Sotelo, R. de Andrade, Jr., D. H. N. Dias, A. C. Ferreira, F. Costa, O. J. Machado, R. A. H. de Oliveira, M. D. A. Santos, and R. M. Stephan, "Tests With One Module of the Brazilian Maglev-Cobra Vehicle", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 23, No. 3, June 2013.
- [2] R. Stephan, R. de Andrade Jr., A. C. Ferreira, F. Costa, O. Machado, "Maglev-Cobra: An Urban Transportation System for Highly Populated Cities", *5-th International Scientific Conference Magnetic Levitation Transport Systems and Technologies* (MTST'17).
- [3] Richard M. Stephan; Costa, F.; de Andrade, R. ; Ferreira, A. C. ; Rodriguez, E. F. . "The experimental line of the MagLev-Cobra project for urban transportation." *In: 23rd International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, 2016, Berlin. MAGLEV'2016, 2016.
- [4] Z. Deng, W. Zhang, J. Zheng, Y. Ren, D. Jiang, X. Zheng, J. Zhang, P. Gao, Q. Lin, B. Song, and C. Deng, "A High-Temperature Superconducting Maglev Ring Test Line Developed in Chengdu", China, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, VOL. 26, NO. 6, SEPTEMBER 2016.
- [5] <http://www.evico.de/en/magnetic-bearings/supratrans-ii/> acessado em 04/04/2018
- [6] Bahr, Nicholas J, *System Safety engineering and Risk Assessment: A practical approach*, 2015, ed. CRC Press Taylor & Francis Group.
- [7] Transportation Research Board – Risk Management in the Marine Transportation System, Conference Proceedings 22, 1999.
- [8] Sunil Nair, J. Luis, Mehrdad S., Lionel B., " An extended systematic literature review on provision of evidence for safety certification", *Elsevier*, 2014.
- [9] <http://www.antt.gov.br/textogeral/Competencias.html> acessado em 04/04/2018
- [10] www.abnt.org.br acessado em 04/04/2018
- [11] Fernando Barbelli Feitosa, "O Consumidor Do Serviço De Transportes Terrestres", revista ANTT. ISSN:2177-6571 Volume 1 Número 1 Novembro 2009.

- [12] DECRETO Nº 1.832, DE 4 DE MARÇO DE 1996 - Regulamento dos Transportes Ferroviários.
- [13] Relatório 6 – *Modelo de Gestão da Segurança Ferroviária*, - INECO, junho de 2015
- [14] CENELEC EN-50126-1 1999 – Railway Applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS).
- [15] Jaehoon Kim, Hyun- Yong Jeong, “Evaluation of the adequacy of maintenance tasks using the failure consequences of railroad vehicles” - *Reliability Engineering and System Safety*, 2013 .
- [16] Hiroshi Fukuoka, “Reliability Evaluation Method for the Railway System: A Model for Complicated Dependency” - *QR of RTRI*, Vol. 43, No. 4, Dec. 2002
- [17] DI – SAFT – 80101, *System Safety Hazard Analysis report*, 20 January 1986.
- [18] MIL –STD – 882B, *System Safety requirements*, 30 march 1984.
- [19] Robert Borgovini, Stephen Pemberton, Michael Rossi (Reliability Analysis Center), Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA), April 1993 .
- [20] MIL-STD-1629, *Procedures for performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, 24 November 1980.
- [21] Mil-Std-785b, *Military Standard: Reliability Program For Systems And Equipment Development And Production* (15 Sept 1980) [No S/S Document].
- [22] Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA), 1993 Reliability Analysis Center NY.
- [23] MIL HDBK-217, *Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment*, 2 December 1991.
- [24] Sucena, Marcelo Prado 2002. *Subsídios para a Alocação de Recursos Financeiros em Sistemas de Transportes Urbanos Sobre Trilhos Baseado em Critérios Técnicos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro
- [25] BS 5760-0:2014 *Reliability of systems, equipment and components. Guide to reliability and maintainability*. 2014

- [26] Coimbra, Marcelo do Vale, 2008. *Modos de Falha dos Componentes da Via Permanente Ferroviária e seus Efeitos no Meio Ambiente*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- [27] NONELECTRONIC PARTS RELIABILITY DATA 1991, Reliability Analysis Center, Department of Defense Information Analysis Center. 87
- [28] Costa, F.S., Oliveira, R. A. H, Pinto, F. A. N. C., Automatic Liquid Nitrogen Supply Line of The Maglev-Cobra Vehicle, International Conference on Magnetically Levitated Systems And Linear Drives (Maglev) 2014.
- [29] Wescley T. B. de Sousa, Richard M. Stephan, Felipe S. Costa, Elkin F. Rodriguez, Flavio G. R. Martins, Roberto A. H. de Oliveira, Rubens de Andrade Jr., “Projeto MagLev Cobra - Levitação Supercondutora para Transporte Urbano”, Rev. Bras. Ensino Fís. vol.38 no.4 São Paulo 2016 Epub Aug 15, 2016.
- [30] Parker O-Ring Handbook ORD 5700, 2007.
- [31] Bardeen J., L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, "Microscopic Theory of Superconductivity", Phys. Rev. 106, 162 - 164 (1957).
- [32] V.L. Ginzburg and L.D. Landau, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 20, 1064 (1950). English translation in: L. D. Landau, Collected papers (Oxford: Pergamon Press, 1965) p. 546
- [33] London, F.; London, H. (1935). "The Electromagnetic Equations of the Supraconductor". Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering sciences. 149 (866): doi:10.1098/rspa.1935.0048.
- [34] Thomas P. Sheahen, “Introduction to High-Temperature Superconductivity” Western Technology Incorporated Derwood, Maryland. Kluwer Academic Publishers (2002).
- [35] Chen-Guang Huang, Cun Xue, Hua-Dong Yong, and You-He Zhou,”Modeling Dynamic Behavior of Superconducting Maglev Systems Under External Disturbances”, Journal of Applied Physics 122, 083904 (2017). [<http://dx.doi.org/10.1063/1.4986295>]
- [36] M. J. Qin, G. Li, H. K. Liu, S. X. Dou, and E. H. Brandt, Phys. Rev. B 66, 024516 (2002).
- [37] C. G. Huang and Y. H. Zhou, Physica C 490, 5 (2013).
- [38] X. X. Wan, C. G. Huang, H. D. Yong, and Y. H. Zhou, AIP Adv. 5,117139 (2015).

- [39] Y. Yeshurun, A. P. Malozemoff, and A. Shaulov, *Rev. Mod. Phys.* 68, 911(1996).
- [40] A. Morandi, *Supercond. Sci. Technol.* 25, 104003 (2012).
- [41] A. Morandi and M. Fabbri, *Supercond. Sci. Technol.* 28, 024004 (2015).

Apêndice A

Tabela 33 - Componentes do Projeto até o terceiro nível

Nível 2	Nível 3	Classificação	Veículo	CT1	Via Elevada	CT2	Descrição	Documentação (Desenho/manual)
Carroceria (Vagão) (1.1.0.0)	Estrutura em fibra do vagão	M	X				Estrutura laminada em fibra de vidro e resina epóxi com o propósito de criar um habitáculo seguro para os passageiros e servir de suporte à todos dos outros subsistemas.	M1.1.1.0
	Janela lateral	M	X				Abertura na carenagem de fibra de vidro na lateral do vagão de passageiro e preenchida de placa de policarbonato transparente de 4mm visando oferecer visão e fonte de luz externa.	M1.1.2.0
	Janela frontal	M	X				Abertura na carenagem de fibra de vidro na região frontal do primeiro e do ultimo vagão e preenchida de placa de policarbonato transparente de 4mm visando oferecer visão, fonte de luz externa e saída em caso de emergência.	M1.1.3.0
	Painel de equipamentos	M	X				Estrutura laminada em fibra de vidro e resina epóxi instalada na região frontal do primeiro e ultimo vagão com a finalidade de suportar equipamentos e abrigar fios e conexões que estariam expostas aos passageiros utilizando também de função estética.	M1.1.4.0
	Suporte de equipamentos	M	X				Estruturas projetadas para unir equipamentos comerciais com furações genéricas na estrutura de fibra de vidro do veículo. Exemplo: suporte de baterias, sup. IHM, suporte Inv. de frequências, sup. Unidade hidráulica, etc.	M1.1.5.0
	Conexão entre vagões	M	X				Compreende reforço estrutural no corpo do veículo e placa de 8mm de espessura de aço inox 304 com finalidade de receber diferentes tipos de conexões para solidarizar mecanicamente 2 vagões do veículo transmitindo esforços mecânicos.	M1.1.6.0

Banco	M	X			Estrutura laminada em fibra de vidro e resina epóxi no corpo do veículo possuindo na sua parte superior placa com camada de espuma para conforto do passageiro. Possui função de alojamento de equipamento hidráulico do sistema de freio e habitáculo da bateria do sistema de monitoramento por câmeras.	M1.1.7.0
Pega mão	M	X			Estrutura fabricada em alumínio e aparafusada no corpo do veículo para que sirva de suporte para o equilíbrio dos passageiros.	M1.1.8.0
Piso	M	X			Placa de fibra de vidro com cobertura de camada polivinílica de acabamento servindo de base para o deslocamento dos passageiros no interior do veículo.	M1.1.9.0
Vedação entre vagões	M	X			Tecido em lona plástica de nylon fixado com velcro em duas camadas , uma externa para impedir a entrada de objetos externos (poeira, chuva, etc.) e uma interna de acabamento.	M1.1.10.0
Estrutura de fixação dos Criostatos	M	X			Peça em aço carbono 1020 fixada à carroceria em 4 parafusos M8 (8.8) que permite a fixação de cada um dos criostatos na sua correta posição na parte inferior do veículo.	M1.1.11.0
Estrutura de fixação das rodas de segurança	M	X			Estrutura fabricada em aço inoxidável 304 que serve de suporte de fixação para as rodas de segurança do veículo e distribui os esforços na carroceria.	M1.1.12.0
Rodas de segurança	M	X			Rodas em Nylon técnico que apoiam o veículo quando há necessidade de tocar o solo, seja numa emergência ou movimentação de manutenção.	M1.1.13.0
Suporte das escovas	M	X			Peça fabricada em aço inoxidável 304 que une o coletor de energia do barramento externo ao veículo.	M1.1.14.0

	coletoras de energia						
--	----------------------	--	--	--	--	--	--

Nível 2	Nível 3	Classificação	Veículo	CT1	Via Elevada	CT2	Descrição	Documentação (Desenho/manual)
Sistema de Porta veicular (1.2.0.0)	Folha de porta	M	X				Estrutura laminada em fibra de vidro com epóxi com o propósito de completar o fechamento do veículo e permitir o embarque e o desembarque de passageiros	M1.2.1.0
	Motor dc	E	X				Motor dc 24V que fornece o torque (5N.m) para o sistema da porta.	E1.2.2.0
	Eixo árvore	M	X				Eixo tubular posicionado na vertical e fixo no veículo que dá estrutura ao mecanismo da porta e possui grau de liberdade de giro em torno do seu eixo longitudinal.	M1.2.3.0
	Barra estabilizadora	M	X				Barra fabricada em aço inox com a função de estabilizar o movimento da porta na sua parte inferior.	M1.2.4.0
	Rolamentos	M	X				Rolamentos de esferas para minimizar o atrito entre o eixo e seu suporte.	M1.2.5.0
	Placa de controle	K	X				Placa eletrônica que realiza o controle do motor DC. (torque, velocidade)	K1.2.6.0
	Fim de Curso	E	X				Chave elétrica que desliga a alimentação do motor quando a castanha chega na posição final.	E1.2.7.0

	Fuso	M	X			Barra com rosca trapezoidal que transforma o movimento de rotação do motor em movimento de translação da porta.	M1.2.8.0
	Castanha	M	X			Peça com rosca interna compatível com o fuso e que excursiona pelo mesmo num valor de passo a cada volta do motor.	M1.2.9.0
	Guia	M	X			Peça que impede que o movimento da castanha seja de rotação e somente de	M1.2.10.0
	Espaçador	M	X			Peça que corrige a distancia entre o braço da porta e a porta	M1.2.11.0

Nível 2	Nível 3	Classificação	Veículo	CT1	Via Elevada	CT2	Descrição	Documentação (Desenho/manual)
Sistema de Controle Veicular (1.3.0.0)	Alavanca de comando	k	X				Manete de acionamento do veículo. Possui funções de acionar rampa de aceleração/desaceleração, mudança de sentido e freio CC.	K1.3.1.0
	CLP TPW	k	X				Controlador lógico programável, equipamento com entradas e saídas digitais e analógicas que pode receber e enviar sinais para comandar ações como abertura de porta por exemplo.	K1.3.2.0
	IHM	k	X				Tela de 15 polegadas 24 Vcc <i>touch screen</i> capaz de alterar parâmetros do CLP, exibir telas de informações e display de alguns comandos.	K1.3.3.0
	<i>Ladder</i>	S	X				Programação realizada no inversor de frequências com a finalidade de controlar rampas de aceleração, limite de velocidade e modos de funcionamento do inversor.	S1.3.4.0

Nível 2	Nível 3	Classificação	Veículo	CT1	Via Elevada	CT2	Descrição	Documentação (Desenho/manual)
Sistema de monitoramento (1.4.0.0)	Sensor de altura	K	X				Sensor ótico instalado na lateral do criostato que tem por objetivo monitorar a altura de levitação de cada um dos criostatos.	K1.4.1.0
	Sensor de velocidade	k	X				Sensor ótico instalado no veículo com objetivo de informar a velocidade instantânea do veículo. Também pode ser utilizado para avaliar a posição do carro.	K1.4.2.0
	Sensor de contagem de barras	k	X				Sensor indutivo que detecta barras no secundário do motor podendo assim, realizar a contagem das barras para referenciar o veículo na pista.	K1.4.3.0
	Câmera veicular	k	X				Câmeras veiculares instaladas na parte inferior do chassi para monitorar o comportamento dos sistemas através de imagens que devem ser projetadas em um monitor no interior do veículo e/ou no centro de controle.	K1.4.4.0
	Acelerômetro	k	X				Sensor que monitora as vibrações e acelerações do veículo. Deve ser instalado no chassi.	K1.4.5.0
	Amperímetro	k	X				Equipamento que mede a corrente na entrada de alimentação de alta tensão do veículo.	K1.4.6.0
	Voltímetro	k	X				Equipamento que mede a tensão nos terminais do inversor de frequências para saber se a tensão da rede está equilibrada.	K1.4.7.0
	Medidor de freq. do inversor	k	X				Avalia a frequência do inversor.	K1.4.8.0
	Equipamento de aquisição de	k	X				Equipamento com portas I/O para ligação dos diversos sensores do veículo e processamento dos sinais.	K1.4.9.0

	dados						
	Software de Proc. Dados	S	X			Software de processamento de dados	S1.4.10.0
	HD	K	X			Equipamento de armazenamento de dados, no qual devem ser gravados todos dados relevantes, tais como: velocidade, data/hora, posição, dados de acelerômetros, imagens de câmeras, etc.	K1.4.11.0

Nível 2	Nível 3	Classificação	Veículo	CT1	Via Elevada	CT2	Descrição	Documentação (Desenho/manual)
Sistema de Comunicação (1.5.0.0)	Gateway	k		X			Recebe o cabo de rede com conexão à rede e envia sinal <i>wi fi</i> .	K1.5.1.0
	Cabo de rede	e		X			RJ45, transmite dados de rede.	E1.5.2.0
	Caixa	m		X	X	X	Caixa de proteção em polietileno que abriga os equipamentos do sistema de comunicação.	M1.5.3.0
	PLC	k		X		X	<i>Power Line Communication</i> , aparelho que transmite e recebe dados em uma linha de alimentação elétrica.	K1.5.4.0
	Antenas	k		X	X	X	Aparelho que envia o sinal <i>wi fi</i> no ambiente.	K1.5.5.0

Nível 2	Nível 3	Classificação	Veículo	CT1	Via Elevada	CT2	Descrição	Documentação (Desenho/manual)
Sistema de Tração/Potência (1.6.0.0)	Quadro de Força	E		X			Quadro de distribuição que fornece energia ao sistema de potência (440V@60Hz) e aos circuitos auxiliares (220V@60Hz). O sistema de potência contém um disjuntor termomagnético de 3 pólos 480Vac-100A. A capacidade de ruptura simétrica: 14kA-480V; 14kA-380V; 18kA-240V.	E1.6.1.0
	Auto-transformador	E		X			Autotransformador trifásico de 100kW e isolamento a seco. Tensão de entrada 440Vac (Y) e tensão de saída 380Vac (Y) com neutro acessível e frequência de 60Hz. Possui grau de proteção IP-00 e classe de isolamento de 0,6kV. A classe de temperatura é F 155°C.	E1.6.2.0
	Conversor Regenerativo	E		X			Painel com retificador regenerativo composto por: Inversor regenerativo CFW11RB; Filtro senoidal; Elementos de proteção de entrada (seccionadora e fusíveis UR ou disjuntor); Componentes na porta do painel (sinaleiros, botões, IHM do retificador) e componentes diversos (bornes, disjuntores auxiliares, etc.).	E1.6.3.0
	Chave seccionadora	E			X		Disjuntor-motor MPW100 - Termomagnético. Proteção contra sobrecarga e curto-circuito de motores elétricos, disparador de curto circuito fixo no valor de 13 vezes a corrente nominal máxima do disjuntor, sensível à falta de fase de acordo com norma IEC/EN 60947-4-1 e DIN VDE 0660 T.102. Permite o uso como chave geral (IEC 60947-2), auto protegido contra curto-circuito até 100 A em 400/415 Vca e com capacidade de interrupção de 50 kA(Icu) em 440 Vca de acordo com IEC/EN 60947-2. Certificações UL/CSA.	E1.6.4.0
	Barramento DC	E		X	X	X	Sistema com 3 condutores individuais blindado, Barramento Blindado tipo 812 / 813, em alumínio com superfície de contato em aço inoxidável (316) e acessórios em aço inoxidável. O invólucro do Barramento Blindado, programa 812 / 813, em PVC especial, possui resistência a	E1.6.5.0

						raios UV. Tensão de até 690Vdc e 320A. Temperatura máxima suportada de -30°C até +55°C.	
Coletores	E	X				Coletores de 100A possuem pressão de contato de 20N, a compensação de desalinhamentos na direção de contato de ± 50 mm, movimento lateral e de ± 100 mm e distância entre o eixo do braço de arraste e superfície de contato do barramento de 115 mm.	E1.6.6.0
Primário do motor linear	E	X				Dados de placa do Primário (tipo primário-curto) utilizado, denominado EALP 1000/6: Tensão 420V (Y); Corrente primária 53A; Frequência 25Hz; 6 pólos; Força 900N; Velocidade 7,8m/s; Classe de Isolação H; Grau de proteção IP 00.	E1.6.7.0
Secundário do motor Linear	E		X	X	X	Secundário longo tipo gaiola de esquilo (Ladder). Possuem barras de alumínio nas ranhuras (12.7 x 12.7 mm) e barras de curto (12.7 x 25.4 mm).	E1.6.8.0
Inversor de frequência	E	X				Modelo CFW-11 0088 T4 SZ. Fonte de alimentação com tolerância -15% a +10%; Frequência 60Hz; Desbalanceamento de fase menor ou igual a 3% da tensão de entrada fase-fase nominal; Rendimento típico menor ou igual a 97%; Fator de potência típico de entrada de 0.94	E1.6.9.0
Disjuntor	E	X				Localizado nos bicos do veículo, permitem a energização/desligamento de todos os equipamentos do veículo .	E1.6.10.0

Nível 2	Nível 3	Classificação	Veículo	CT1	Via Elevada	CT2	Descrição	Documentação (Desenho/manual)
Sistema de Freio Mecânico (1.7.0.0)	Bomba hidráulica	E	X				Unidade hidráulica que fornece pressão ao fluido de trabalho.	E1.7.1.0
	Tanque de óleo	M	X				Reservatório de abastecimento de óleo para o sistema de freio.	M1.7.2.0
	Acumulador	M	X				Vaso de pressão que armazena óleo pressurizado pela bomba hidráulica.	M1.7.3.0
	Magotes flexíveis	M	X				tubulação flexível em borracha com a função de conduzir o óleo até o seu destino.	M1.7.4.0
	Terminal de mangote	M	X				Peça com rosca (XXXX) presa ao final do mangote e que conecta este em outro dispositivo.	M1.7.5.0
	Manômetro	M	X				Medidor de pressão manométrica do óleo dentro do circuito pressurizado.	M1.7.6.0
	Pistão esquerdo	M	X				Atuador que efetua a força de frenagem na direção normal à pista de frenagem.	M1.7.7.0
	Pistão direito	M	X				Atuador que efetua a força de frenagem na direção normal à pista de frenagem.	M1.7.8.0
	Sapata de freio	M	X				Elemento de atrito que entra em contato com a pista de frenagem	M1.7.9.0

Pista de Frenagem	M		X	X	X	Barra chata fabricada em aço 1020 fixada ao longo a via que tem a função de servir de estrutura a ser apertada durante a frenagem mecânica do veículo.	M1.7.10.0
Botão de acionamento no painel	k	X				Botão tipo soco localizado no painel de operação que aciona o freio mecânico.	K1.7.11.0
Pressostato do acumulador	k	X				Sinal elétrico do manômetro proporcional ao valor da pressão no acumulador de óleo, permitindo o acionamento da bomba quando o a pressão atinge nível baixo pré determinado.	K1.7.12.0

Nível 2	Nível 3	Classificação	Veículo	CT1	Via Elevada	CT2	Descrição	Documentação (Desenho/manual)
Sistema de Levitação (1.8.0.0)	Criostato	M	X				Equipamento que possui supercondutores no seu interior e possui a função de receber todas as cargas mecânicas da levitação. Possui isolamento térmico e recebe nitrogênio líquido para permitir o funcionamento dos Supercondutores.	M1.8.1.0
	Trilho	M		X	X	X	Equipamento construído a partir de ímãs de terras raras e ferro. Possui a função de fornecer o campo magnético necessário para a levitação dos supercondutores. Fica instalado na pista (solo).	M1.8.2.0
	Guia de abastecimento	M		X			Estrutura fabricada em aço inox que possui a função de manter o veículo numa posição elevada e alinhada em relação ao trilho para a realização do processo de abastecimento.	M1.8.3.0
	Fixação do criostato	M	X				Peça fabricada em alumínio que é aparafusada ao criostato e serve de fixação do mesmo ao veículo.	M1.8.4.0

Nível 2	Nível 3	Classificação	Veículo	CT1	Via Elevada	CT2	Descrição	Documentação (Desenho/manual)
Sistema de Abastecimento e vácuo (1.9.0.0)	Tanque TM500	M		X			Tanque cedido pela concessionária fornecedora de fluido criogênico com grande capacidade de volume instalado no piso térreo da estação CT1.	M1.9.1.0
	Gradil de isolamento	M		X			Grade instalada em torno do tanque TM 500 para evitar a aproximação de pessoas não autorizadas.	M1.9.2.0
	Tubulação isolada	M		X			Tubulação isolada à vácuo que leva o fluido criogênico até o andar de operação do veículo.	M1.9.3.0
	Manifold	M		X			Estrutura tubular com múltiplas saídas de fluido, cada qual com seu manômetro e válvula de regulação,	M1.9.4.0
	Mangueiras flexíveis s/ isolamento	M		X			Mangueira flexível fabricada em aço inox 304 sem isolamento térmico para conectar as 2 linhas de abastecimento ao manifold. (2 mangueiras)	M1.9.5.0
	Linha de abastecimento móvel	M		X			Tubos isolados à vácuo montados sobre uma estrutura móvel que realizam a distribuição do fluido em cada criostato ao longo do veículo. (uma linha para cada lado do veículo)	M1.9.6.0
	Botoneiras de acionamento	E		X			12 Botões tipo on/off instalados em uma caixa com fonte de tensão 24V@6A que ligam e desligam as válvulas da linha de	E1.9.7.0

						abastecimento. (Uma caixa para cada lado do veículo)	
Bomba de Vácuo <i>Hi Cube 80</i> (pequena)	M		X			Bomba de vácuo Pfeiffer utilizada para efetuar isolamento à vácuo em cada um dos criostatos.	M1.9.8.0
<i>Fittings</i> de vácuo	M	X	X			Peças de conexão de vácuo como presilhas, <i>o-rings</i> , anéis centralizadores, tubos..	M1.9.9.0

Nível 2	Nível 3	Classificação	Veículo	CT1	Via Elevada	CT2	Descrição	Documentação (Desenho/manual)
Sistemas Auxiliares (1.10.0.0)	Bateria 12V	E					Baterias de chumbo/acido 12 V destinada à alimentação de equipamentos eletrônicos no interior do veículo.	E1.10.1.0
	<i>Led</i> Iluminação interna	K					Fita de <i>Led</i> instalada no teto do veículo para iluminação interna.	K1.10.2.0
	Tomada tipo isqueiro	E					Tomada tipo vela tipo isqueiro veicular localizada no interior do veículo para alimentação de alguns equipamentos 12V.	E1.10.3.0
	Disjuntores	E					Disjuntores de segurança localizados embaixo do banco que abrem ou fecham o circuito para as baterias.	E1.10.4.0
	Display de nível de bateria	K					Mostrador digital do nível de tensão e corrente das baterias.	K1.10.6.0
	Controle de porta de estação	K					Controle remoto que aciona a abertura e fechamento das portas de estação.	K1.10.7.0
	Lâmpada de indicação de sentido	K					Lâmpada instalada no painel de controle do operador que indica o sentido de acionamento do inversor.	K1.10.8.0

